

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

RODOLFO MUSSIATO GONÇALVES

**PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS
ASSOCIADO A MÉTODOS DE FUSÃO DE
ESTIMATIVAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA
MONITORADOS POR MEDIDAS CONVENCIONAIS E
FASORIAIS**

Florianópolis

2016

RODOLFO MUSSIATO GONÇALVES

**PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS
ASSOCIADO A MÉTODOS DE FUSÃO DE
ESTIMATIVAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA
MONITORADOS POR MEDIDAS CONVENCIONAIS E
FASORIAIS**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elé-
trica para a obtenção do Grau de Mes-
tre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Antonio José Alves
Simões Costa, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Cata-
rina

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gonçalves, Rodolfo Mussiato

Processamento de erros grosseiros associado a métodos de fusão de estimativas em sistemas de potência monitorados por medidas convencionais e fasoriais / Rodolfo Mussiato Gonçalves ; orientador, Antonio José Alves Simões Costa - Florianópolis, SC, 2016.
128 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Estimação de estados em sistemas de potência. 3. Medidas fasoriais sincronizadas. 4. Métodos de fusão de estimativas. 5. Processamento de erro grosseiro. I. Simões Costa, Antonio José Alves. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Rodolfo Mussiato Gonçalves

**PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS
ASSOCIADO A MÉTODOS DE FUSÃO DE
ESTIMATIVAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA
MONITORADOS POR MEDIDAS CONVENCIONAIS E
FASORIAIS**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 13 de outubro de 2016.

Prof. Marcelo Lobo Heldwein, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Miguel Moreto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Nelson e Fátima, e também à minha irmã, Bárbara, pelo carinho, incentivo e apoio incondicional.

A todos os professores com quem convivi e aprendi no decorrer deste mestrado. Dentre eles, um agradecimento em especial ao meu orientador, Professor Antonio Simões Costa, pela confiança em mim depositada, e também pela dedicação e disposição em ajudar seja elucidando minhas dúvidas ou compartilhando experiências durante as discussões que foram essenciais para realização deste trabalho.

À Juliana, pelo carinho, incentivo, ajuda, e principalmente pela paciência e compreensão nos momentos mais difíceis.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

A todos os amigos que de alguma forma fizeram desta etapa um caminho menos árduo e mais divertido. Desde os velhos amigos na qual a amizade foi fortalecida até os novos amigos que Florianópolis me proporcionou.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho. Certamente, foram tempos de aprendizado e desenvolvimento não apenas em âmbito acadêmico e profissional, mas também pessoal.

RESUMO

PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS ASSOCIADO A MÉTODOS DE FUSÃO DE ESTIMATIVAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA MONITORADOS POR MEDIDAS CONVENCIONAIS E FASORIAIS

Rodolfo Mussiato Gonçalves

Florianópolis

2016

Este trabalho investiga os ganhos de eficiência no processamento de erros grosseiros associados à estimação de estados, proporcionados pelo cruzamento de informações convencionais obtidas do sistema SCADA e de medidas fasoriais sincronizadas. A integração destas últimas aos dados oriundos do sistema SCADA é feita através da aplicação da teoria de fusão de estimativas. A metodologia utilizada baseia-se na comparação de resultados do processamento de erros grosseiros, desde a detecção e identificação até a recuperação de medidas espúrias, realizado mediante diferentes métodos, tais como cruzamento de informações, resíduos normalizados, método- \hat{b} e identificação baseada em testes de hipóteses (HTI). Também são comparados os resultados finais da fusão alcançados via pós-processamento do estágio de identificação/recuperação de erros grosseiros. As análises e conclusões reportadas neste trabalho são amparadas por diversos estudos de caso realizados em três sistemas-teste do IEEE. Os resultados apresentados apontam que os benefícios da inclusão de medidas fasoriais no sistema podem ser aproveitados no processo de estimação de estados, aperfeiçoando os estágios desde detecção/identificação de erros grosseiros até a recuperação das medidas espúrias, contribuindo desse modo para uma melhoria na qualidade das estimativas finais.

Palavras-chave: processamento de erros grosseiros, estimação de estados em sistemas de potência, medidas fasoriais sincronizadas, métodos de fusão de estimativas.

ABSTRACT

BAD DATA PROCESSING ASSOCIATED WITH ESTIMATES FUSION METHODS IN POWER SYSTEMS MONITORED BY CONVENTIONAL AND PHASOR MEASUREMENTS

Rodolfo Mussiato Gonçalves

Florianópolis

2016

This work evaluates the improvements on bad data processing associated with power system state estimation, achieved by crosschecking information independently provided by conventional measurements and synchronized phasor data. The integration of the two types of measurements is accomplished through the use of estimation fusion theory. The adopted methodology is based on the comparison of bad data processing results, comprising detection, identification and recovery of spurious measurements. Those stages are performed by different methods, such as information crosschecking, normalized residuals, the $\hat{\mathbf{b}}$ -method and hypothesis testing identification (HTI). The final results provided by estimation fusion, after the bad data identification/recovery stage takes place, are also compared and analyzed. The analysis and conclusion reported in this work are supported by several case studies in three IEEE test-systems. Results obtained show that the benefits of deploying phasor measurement unit in power systems can be extended to bad data processing in state estimation, encompassing all stages from bad data detection/identification to the recovery of spurious measurements. As a consequence, the quality of the final estimates is enhanced.

Keywords: bad data processing, power system state estimation, synchronized phasor measurements, estimation fusion methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Arquitetura típica de um sistema SCADA	26
Figura 2.2	Arquitetura típica de um SMFS	31
Figura 2.3	Estrutura genérica de uma PMU	32
Figura 4.1	Rede Centralizada.	54
Figura 4.2	Rede Descentralizada.	54
Figura 4.3	Rede Híbrida.	55
Figura 4.4	Rede de fusão descentralizada baseada em medidas oriun- das dos sistemas SCADA e fasorial.	60
Figura 6.1	Plano de Medição - Medidas SCADA.	82
Figura 6.2	Plano de Medição - Medidas Fasoriais.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Exemplo de arquitetura SCADA para SEE	29
Tabela 5.1	Tabela de Diagnóstico	74
Tabela 5.2	Diagnóstico para o Caso Particular	74
Tabela 6.1	Precisão das medidas utilizadas na EESP	78
Tabela 6.2	Número de Medidas no Plano de Medição do Sistema-Teste IEEE 14-barras	81
Tabela 6.3	Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1.A Sistema-teste 14 barras ..	83
Tabela 6.4	Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1.B Sistema-teste 14 barras ..	83
Tabela 6.5	Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2.A Sistema-teste 14 barras ..	84
Tabela 6.6	Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2.B Sistema-teste 14 barras ..	85
Tabela 6.7	Número de Medidas no Plano de Medição do Sistema-Teste IEEE 118-barras	86
Tabela 6.8	Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 1.A Sistema-teste 118 barras	87
Tabela 6.9	Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 1.B Sistema-teste 118 barras	87
Tabela 6.10	Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1.A Sistema-teste 118 barras ..	88
Tabela 6.11	Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1.B Sistema-teste 118 barras ..	88
Tabela 6.12	Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 2.A Sistema-teste 118 barras	89
Tabela 6.13	Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 2.B Sistema-teste 118 barras	89
Tabela 6.14	Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2.A Sistema-teste 118 barras ..	90
Tabela 6.15	Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2.B Sistema-teste 118 barras ..	90
Tabela 6.16	Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 3.A Sistema-teste 118 barras	91

Tabela 6.17 Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 3.A Sistema-teste 118 barras .	91
Tabela 6.18 Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 3.B Sistema-teste 118 barras	92
Tabela 6.19 Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 3.B Sistema-teste 118 barras .	92
Tabela 6.20 Metodologia para recuperação dos EGs identificados..	93
Tabela 6.21 Média dos Indicadores de Desempenho da Estimativa Final - Sistema-teste 118 barras	94
Tabela 6.22 Número de Medidas no Plano de Medição do Sistema-Teste IEEE 300-barras.	95
Tabela 6.23 Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1 Sistema-teste 300 barras. . . .	96
Tabela 6.24 Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2 Sistema-teste 300 barras. . . .	97
Tabela 6.25 Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 3 Sistema-teste 300 barras. . . .	97
Tabela 6.26 Média dos Indicadores de Desempenho da Estimativa Final - Sistema-teste 300 barras	98
Tabela A.1 Exemplo	107
Tabela B.1 Medidas de Módulo de Tensão.	111
Tabela B.2 Medidas de Injeção de Potência	111
Tabela B.3 Medidas de Fluxo de Potência.	111
Tabela B.4 Medidas de Tensão Complexa	112
Tabela B.5 Medidas de Corrente Complexa	112
Tabela C.1 Medidas de Módulo de Tensão.	115
Tabela C.2 Medidas de Injeção de Potência	116
Tabela C.3 Medidas de Fluxo de Potência.	117
Tabela C.4 Medidas de Tensão Complexa	118
Tabela C.5 Medidas de Corrente Complexa	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
BLUE	<i>Best Linear Unbiased Estimation</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
DFT	Discrete Fourier Transform
EESP	Estimação de Estados em Sistemas de Potência
EG	Erro Grosseiro
Glonass	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
HTI	<i>Hypothesis Testing Identification</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEfic	Índice de Eficiência/Eficácia
IEsp	Índice de Espalhamento de Erro
Labspot	Laboratório de Sistemas de Potência
LMMSE	<i>Linear Minimum Mean Square Error</i>
LUMV	<i>Linear Unbiased Minimum Variance</i>
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
MTU	<i>Master Terminal Unit</i>
MVAP	Mínimos Valores Absolutos Ponderados
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
PPS	Pulso por Segundo
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCDR	<i>Symmetrical Component Distance Relay</i>
SEE	Sistemas de Energia Elétrica
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SMFS	Sistema de Medição Fasorial Sincronizada
Std	<i>Standard</i>
TC	Transformador de Corrente

TP	Transformador de Potencial
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Contextualização do Problema	21
1.2 Objetivos e Contribuições da Dissertação	23
1.3 Organização da Dissertação	23
2 FONTES DE DADOS PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	25
2.1 Introdução	25
2.2 Sistema SCADA	25
2.2.1 Arquitetura típica de um sistema SCADA	26
2.2.2 Aplicação do sistema SCADA em sistemas elétricos de potência	28
2.3 Sistema de Medição Fasorial Sincronizado	30
2.3.1 Arquitetura do sistema de medição fasorial sincronizado	31
2.3.2 Aplicação da medição fasorial sincronizada nos sistemas elétricos de potência	35
2.4 Conclusão	35
3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	37
3.1 Introdução	37
3.2 Medidas Utilizadas na EESP	39
3.3 Observabilidade da Rede Elétrica	39
3.4 Modelo de Medição Não Linear	41
3.5 Formulação Matemática via Método MQP	42
3.6 Solução da EESP via Método da Equação Normal	43
3.6.1 Matriz ganho ou informação	46
3.6.2 Aspectos computacionais e algoritmo	48
3.6.3 Inclusão de informações <i>a priori</i>	49
3.7 Conclusão	49
4 INCLUSÃO DE MEDIDAS FASORIAIS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS	51
4.1 Introdução	51
4.2 Fusão de Dados com Múltiplos Sensores	52

4.2.1	Estrutura dos sistemas de fusão de dados	53
4.2.2	Arquitetura dos sistemas de fusão de dados	53
4.2.3	Formulação matemática	56
4.2.4	Aplicação em sistemas elétricos de potência	57
4.3	Conclusões	60
5	PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS	63
5.1	Introdução	63
5.2	Trabalhos Envolvendo o Processamento de Medidas Fasoriais Desenvolvidos no LABSPOT	64
5.3	Notação Utilizada no Desenvolvimento do Trabalho	65
5.4	Matrizes de Covariância Próprias	65
5.5	Matrizes de Covariância Cruzadas	66
5.6	Métodos de Identificação de EGs	67
5.6.1	Teste dos resíduos normalizados próprios	68
5.6.2	Método- \hat{b} próprio	69
5.6.3	HTI	69
5.6.4	Teste dos resíduos normalizados cruzados	72
5.6.5	Método- \hat{b} cruzado	73
5.7	Diagnóstico para Presença de EGs	73
5.8	Conclusão	75
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	77
6.1	Introdução	77
6.2	Considerações Sobre as Simulações	77
6.2.1	Metodologia e hipóteses adotadas	77
6.2.2	Critério de avaliação dos resultados	79
6.3	Resultados para o Sistema-Teste IEEE 14-barras	81
6.3.1	Caso 1: Presença de EGs apenas em medidas SCADA	83
6.3.2	Caso 2: Presença de EGs apenas em medidas fasoriais	84
6.4	Resultados para o Sistema-Teste IEEE 118-barras	85
6.4.1	Caso 1: Presença de EGs em medidas convencionais situ- adas dentro da área observável por PMUs	86
6.4.2	Caso 2: Presença de EGs em medidas convencionais loca- lizadas interna e externamente à área observável por PMUs	89
6.4.3	Caso 3: Presença de EGs em medidas fasoriais	91
6.4.4	Recuperação das medidas e avaliação da estimativa final	93

6.5	Resultados para o Sistema-Teste IEEE 300-barras	94
6.5.1	Caso 1: Presença de EGs em medidas convencionais situadas internamente à área observável por PMUs	95
6.5.2	Caso 2: Presença de EGs em medidas SCADA localizadas dentro e fora da ilha observável por medidas fasoriais	96
6.5.3	Caso 3: Presença de EGs em medidas fasoriais	97
6.5.4	Avaliação da estimativa final	98
6.6	Conclusões	99
7	CONCLUSÕES	101
7.1	Considerações Finais	101
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	103
	ANEXO A – NOTAÇÃO UTILIZADA PARA MEDIÇÕES NOS RAMOS DO SISTEMA	107
	ANEXO B – PLANOS DE MEDIÇÃO SCADA E FASORIAL SISTEMA-TESTE IEEE 118-BARRAS	111
	ANEXO C – PLANOS DE MEDIÇÃO SCADA E FASORIAL SISTEMA-TESTE IEEE 300-BARRAS	115
	REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) tem extrema importância para a operação de sistemas elétricos de potência (SEP), por ser a função encarregada de disponibilizar informações confiáveis em tempo real a respeito do ponto de operação. Estas informações são essenciais para subsidiar os aplicativos responsáveis por assegurar a operação segura da rede elétrica [1, 2]. A EESP é realizada a partir da aquisição em tempo real de medições das grandezas que descrevem o comportamento do sistema.

São definidos como estados da rede elétrica os valores de módulo e ângulo das tensões de todas as barras da rede elétrica. O conhecimento das variáveis de estados torna possível a determinação de qualquer outra grandeza associada à condição de operação corrente. Tanto a monitoração quanto a análise da segurança do sistema dependem da disponibilidade destes estados estimados, evidenciando a relevância do processo de estimação para a operação em tempo real. Portanto, as estimativas devem ser fiéis ao atual ponto de operação do sistema de potência.

Por este motivo, a estimação de estados em sistemas de potência é uma função relativamente complexa, sendo composta pelos seguintes subproblemas: análise de observabilidade, detecção e identificação de erros grosseiros, e possivelmente também a recuperação das medidas portadoras de erros grosseiros [3].

Por várias décadas desde as primeiras implementações da EESP, as medidas eram fornecidas exclusivamente por um sistema de aquisição de dados assíncronos, transmitidos para o processamento no centro de operações. Este sistema é definido pela sigla SCADA (da sigla em Inglês para *Supervisory Control and Data Acquisition*). As medidas oriundas deste sistema são frequentemente referidas como medidas *convencionais*.

Mais recentemente, houve um grande avanço nas ferramentas de monitoração proporcionado pelo advento dos sistemas de medição fasorial sincronizada [4]. Atualmente verifica-se uma gradual mas crescente penetração de PMUs (da sigla em Inglês para *Phasor Measurement Units*) nos sistemas de potência. Como consequência da inclusão desta nova instrumentação, medidas fasoriais sincronizadas estão sendo disponibilizadas para instrumentalizar a operação de redes elétricas, o

que também abre novas perspectivas para a monitoração e análise da segurança.

Tendo em vista o fato de que as medidas fasoriais são fornecidas com uma taxa de amostragem muito superior às das medidas SCADA, além de apresentarem maior nível de exatidão, é notório que a sua integração à estimação de estados deve proporcionar melhorias significativas nos processos de monitoração e análise de segurança do sistema de potência.

Consequentemente, a revisão da literatura técnica na área revela um crescente interesse na integração das medidas fasoriais na estimação de estados, combinando-as com dados oriundos do sistema SCADA. Diversos caminhos foram trilhados, como por exemplo as estratégias utilizadas em [5–16].

A referência [13] relata excelentes resultados obtidos a partir da fusão de estimativas, sendo por este motivo o método adotado neste trabalho. Por utilizar um módulo de estimação para cada classe de medida processada, a fusão de estimativas é vista como um método adequado para combinar as informações SCADA e fasoriais, uma vez que viabiliza o aproveitamento de estimadores convencionais já existentes nos centros de operação.

Entretanto, medidas fasoriais, assim como as convencionais, são susceptíveis a erros de medição [4, 17]. Em que pese os esforços dedicados à integração das medidas sincronizadas, são poucas as metodologias propostas na literatura técnica para processamento de erros grosseiros associados às duas classes de medidas. Para alcançar um tratamento de medidas espúrias eficaz, a metodologia deve ser capaz de detectar, identificar e recuperar medidas errôneas tanto no plano de medição convencional quanto no plano de medição fasorial. Devido a penetração gradual de PMUs no sistema de potência, deve ser considerada a falta de observabilidade referente às medidas oriundas do sistema de medição fasorial. Também é importante que esta metodologia seja viável em termos do tempo de processamento, uma vez que a EESP é uma ferramenta que disponibiliza informações confiáveis em tempo real para garantir a operação segura do sistema elétrico. Por fim, a metodologia ainda deve operar em conjunto com alguma técnica de integração das duas classes de medidas à EESP.

Portanto, o processamento de erros grosseiros em sistemas monitorados por medidas fasoriais e convencionais ainda se constitui em um desafio. Esta constatação somada à importância do tratamento de erros grosseiros no decorrer do processo de EESP, são as principais motivações para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2 Objetivos e Contribuições da Dissertação

O objetivo desta dissertação é aprimorar o desempenho da estimação de estados, como foco principal no processamento de erros grosseiros em sistemas de potência monitorados por medidas SCADA e fasoriais sincronizadas.

Uma contribuição recente nesse sentido foi apresentada em [18]. A ideia central é tirar proveito da existência das duas estruturas de medição, considerando a hipótese de independência estatística das duas classes de medidas. A identificação de medidas espúrias é então baseada no cruzamento de resultados obtidos individualmente a partir de cada uma das referidas classes de medidas.

Esta dissertação aprofunda a metodologia proposta em [18, 19], a qual se restringe ao uso do clássico tratamento de erros grosseiros com base nos resíduos normalizados [20–22]. Assim, neste trabalho são também exploradas técnicas mais elaboradas, como o método- \hat{b} [1] e a identificação baseada em testes de hipóteses ou HTI (da sigla em Inglês para *Hypothesis Testing Identification*) [23], que reconhecidamente fornecem bons resultados na identificação de erros grosseiros em medidas correlacionadas [24]. Adicionalmente, analisa-se neste trabalho o desempenho dos métodos propostos também no caso realístico em que a rede elétrica não é completamente observável com respeito às medidas fasoriais.

A exploração destas outras abordagens de identificação torna possível apontar a combinação de métodos mais efetiva para o tratamento de medidas espúrias, incluindo todas as etapas desde a detecção e identificação até a recuperação destas medidas, para diferentes casos e situações. Finalmente, o processo completo de estimação é concluído mediante a realização da fusão dos resultados finais das estimativas, com o propósito de avaliar a eficácia da abordagem proposta.

1.3 Organização da Dissertação

Neste capítulo introdutório, é apresentada uma contextualização do problema do processamento de erros grosseiros com a inclusão das medidas fasoriais na estimação de estados, além de apresentar o objetivo e contribuições deste trabalho. Esta dissertação é ainda composta por outros seis capítulos:

- **Capítulo 2:** descreve as principais fontes de dados para a esti-

mação de estados em sistemas de potência;

- **Capítulo 3:** explana os conceitos envolvidos na estimação de estados. Inicialmente é discutida a formulação matemática do problema, incluindo os possíveis métodos de solução;
- **Capítulo 4:** apresenta a estratégia adotada para incorporar as medidas fasoriais sincronizadas à estimação de estados mediante aplicação da teoria da fusão de dados. As características e arquiteturas dos estimadores utilizados também são abordadas;
- **Capítulo 5:** são apresentados e analisados os métodos utilizados neste trabalho para o processamento de erros grosseiros em sistemas de potência monitorados por medidas convencionais e fasoriais;
- **Capítulo 6:** exhibe desde as ferramentas e condições utilizadas no ambiente de simulação durante a pesquisa, até os principais resultados obtidos para os três sistemas-teste, acompanhados de suas respectivas análises e interpretações;
- **Capítulo 7:** apresenta as conclusões da dissertação além de apontar sugestões para trabalhos futuros.

2 FONTES DE DADOS PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 Introdução

Antes de adentrar em tópicos específicos de estimação de estados, é importante descrever os equipamentos de medição responsáveis por fornecer os dados necessários para a execução do processo de estimação. Este capítulo, portanto, aborda as tecnologias de medição e sensoramento, desde a origem e uso das medidas SCADA até a recente incorporação de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) às redes elétricas de potência. Pelo fato de não pertencerem a sistemas de medição em tempo real, as pseudomedidas e informações *a priori* serão discutidas no capítulo seguinte, juntamente com o tema observabilidade da rede elétrica.

2.2 Sistema SCADA

O sistema SCADA permite supervisionar e controlar processos de porte e complexidade variada, através da troca de informação entre uma estação central e uma ou mais unidades remotas. Estes equipamentos são responsáveis pela aquisição de dados dos dispositivos de campo. A troca de informação é realizada a partir da utilização de redes de comunicação. As informações coletadas são manipuladas, armazenadas e apresentadas ao operador. Essa apresentação acontece em multiplicidade de formas via interface de alto nível [25], contribuindo para melhor análise e tomada de decisão por parte dos operadores.

Portanto, os sistemas de supervisão proporcionam três funções básicas:

1. **Funções de supervisão:** permite fácil visualização e análise de variáveis do processo, alarmes e condições de operação, além de armazenar o histórico destas variáveis e também a ocorrência de alarmes associados ao processo;
2. **Funcões de operação:** ação direta sobre atuadores, o que possibilita comandos como por exemplo ligar/desligar equipamentos presentes na planta do processo supervisionado;
3. **Funções de controle:** alguns sistemas viabilizam a programa-

ção para atuação automática em determinadas situações ou condições de operação.

2.2.1 Arquitetura típica de um sistema SCADA

A Figura 2.1 foi adaptada de [26] por [25], e ilustra de maneira esquemática a arquitetura típica de um sistema SCADA.

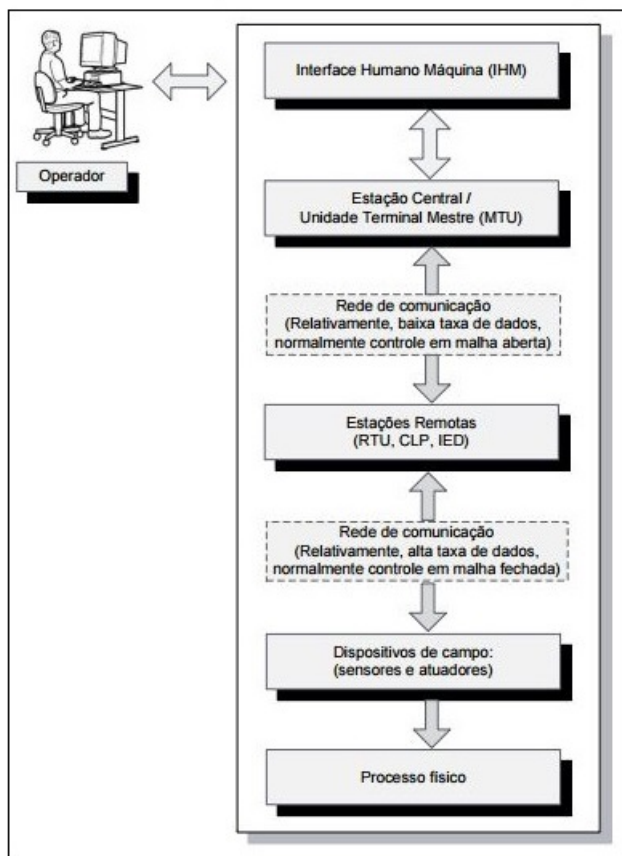


Figura 2.1 – Arquitetura típica de um sistema SCADA

Acompanhando a ilustração acima, uma arquitetura típica de

um sistema SCADA é formada pelos seguintes componentes:

- **Processo Físico:** é a planta que será supervisionada a partir das informações obtidas pelo sistema de supervisão;
- **Dispositivos de campo:** São os componentes que se encontram diretamente conectados à planta a ser controlada/supervisionada. Os sensores e atuadores são exemplos de dispositivos de campo;
- **Estação Remota:** Conectados a sensores e atuadores, os dispositivos efetuam a coleta de dados e realizam ações de controle sobre o processo. Estes dispositivos podem ser, unidades terminal remota ou RTU (da sigla em Inglês para *Remote Terminal Unit*), controladores lógicos programáveis definido pela sigla CLP, e também dispositivos eletrônicos inteligentes ou IED (da sigla em Inglês para *Intelligent Electronic Devices*);
- **Estação Central:** também conhecida como unidade terminal mestre ou MTU (da sigla em Inglês para *Master Terminal Unit*), é a unidade principal do sistema SCADA sendo de sua responsabilidade coletar, armazenar e processar as informações transmitidas pelas estações remotas, a fim de apresentá-las aos operadores. Na estação central está também localizado o banco de dados do servidor, conhecido como DB (da sigla em Inglês para *Database*), composto por equipamentos encarregados pelo armazenamento e distribuição seletiva das informações;
- **Rede de comunicação:** todos os dados do sistema SCADA são transmitidos através desta plataforma. Ela conecta as estações remotas tanto com os dispositivos de campo como também com a MTU, ou ainda diferentes computadores ou consoles localizados dentro de uma rede corporativa. Sua implementação pode ser realizada a partir de diversos meios físicos, permitindo com que a rede se comunique a grandes distâncias sem perda de desempenho;
- **Interface Homem Máquina:** definido pela sigla IHM (ou HMI, sigla do Inglês para *Human Machine Interface*), é responsável pela interação dos operadores com os dados coletados e processados pela MTU. Essas informações são apresentadas em formatos adequados para melhor compreensão e análise, facilitando a tomada de decisão por parte dos operadores, viabilizando o controle dos equipamentos de campo a fim de que seja mantida a melhor condição de operação para o processo supervisionado.

Essa arquitetura possui características importantes. Uma delas é a sua flexibilidade, o que a torna facilmente escalável. Além de flexível, a arquitetura do sistema SCADA é aberta. Este fato possibilita tanto a utilização de *hardware* e *software* de vários fabricantes, bem como a interconectividade com outros sistemas.

O tópico seguinte relata a introdução e utilização do sistema SCADA em sistemas elétricos de potência.

2.2.2 Aplicação do sistema SCADA em sistemas elétricos de potência

Redes elétricas são estruturas de elevada complexidade, e em decorrência do desafio da operação em analisar e processar uma grande quantidade de informações em tempo real, tornou-se imprescindível a automatização deste sistema.

Sistemas de supervisão e controle contínuos estão diretamente relacionados com a operação do sistema de potência, já que estes sistemas coletam, processam, armazenam os dados (analógicos/digitais) adquiridos, e municiam os operadores através de uma interface homem máquina, auxiliando-os na tomada de decisão quando sejam necessárias intervenções. O objetivo é garantir a continuidade e qualidade do suprimento de energia elétrica, com segurança e eficiência.

Por este motivo, distintas alternativas foram propostas para processar dados em tempo real a fim de monitorar o sistema de potência. Isso influenciou o desenvolvimento de metodologias para monitoração do sistema baseadas na estimação de estados, que permite processar diversas classes de medidas e ainda considera a existência dos erros inerentes às mesmas, além de viabilizar a determinação de quantidades não monitoradas. Todas essas características citadas ressaltam algumas das vantagens ao utilizar o sistema SCADA em sistemas de potência. Outro fator importante é que a redundância das grandezas medidas possibilita estimar o estado do sistema mesmo quando algumas delas são perdidas.

Como previamente comentado, a flexibilidade da arquitetura SCADA permite dividir o sistema em diversas camadas, ou níveis hierárquicos, onde cada uma dessas parcelas cumpre seu papel dentro do processo de aquisição e controle de dados. Porém, tanto a complexidade no trânsito de informações quanto o investimento necessário para implantação e manutenção do sistema são diretamente proporcionais à sua quantidade de níveis. Portanto, dentro das características de

cada empresa do setor elétrico, pode ser utilizado um número maior ou menor de níveis operativos [27].

A Tabela 2.1, exibe uma possível arquitetura do sistema SCADA aplicada a sistemas de energia elétrica (SEE), onde os níveis 0 e 1 englobam os sensores, atuadores e dispositivos de campo. O nível 2 são os instrumentos responsáveis por coletar os dados, e ainda efetuar as ações de controle sobre o processo. Os três níveis restantes (3, 4 e 5) são as interações dos operadores em distintas localidades com os dados adquiridos e processados [27].

Tabela 2.1 – Exemplo de arquitetura SCADA para SEE

Equipamento/Local	Nível Hierárquico
Plataformas Computacionais (IHM) no centro de operação do sistema	Nível 5
Plataformas Computacionais (IHM) no centro de operação regional do sistema	Nível 4
Plataformas Computacionais (IHM) local	Nível 3
Unidade Central de Subestação; RTU's; CLP's; IED's; etc.	Nível 2
Relés de Proteção; Transformadores de Potencial e Corrente; etc.	Nível 1
Disjuntores; Seccionadoras; Controles de TAP; Reguladores de carga e frequência; etc.	Nível 0

Tendo por base arquiteturas similares à apresentada, é realizada a coleta para interpretação, análise e controle de medidas tanto analógicas como digitais.

O primeiro grupo são as grandezas mensuradas a partir dos transformadores de corrente (TC), transformadores de potencial (TP), transdutores, etc. Para EESP, as principais medidas monitoradas pelo sistema SCADA pertencem a esta classe. São elas: magnitudes das tensões e injeções de potência nas barras, além de correntes e fluxos de potência ativa e reativa nos ramos. Isso não significa que outras quantidades analógicas supervisionadas não sejam importantes para o sistema, já que medidas como frequência, velocidades, pressão, temperaturas, entre outras, são grandezas relevantes para manter o sistema em funcionamento com qualidade e segurança.

Nas medidas digitais estão presentes os *status* dos equipamentos de manobra (aberto/fechado), leituras de posição (taps de transforma-

dores por exemplo) e também o estado de funcionamento de alguns dispositivos (normal/falha). Estas grandezas também são importantes para a EESP, já que são utilizadas pelo configurador de redes para determinar a atual topologia da rede elétrica. Os trabalhos [28–30] apresentam métodos para identificação de erros em informações digitais. Com isso, torna-se possível identificar erros de topologia e consequentemente evita-se que o configurador de redes modele o sistema de uma forma que não condiz com a realidade.

Desta maneira o sistema SCADA passou a ser utilizado nos sistemas elétricos de potência, e seu eficiente funcionamento aliado à sua grande confiabilidade contribuíram para que o sistema se consolidasse neste meio. São justamente essas características que incentivaram a utilização da fusão de dados para incorporar outras classes de medidas na estimação de estados, já que além de qualificar os resultados com a melhor exatidão das novas classes de medidas, aproveita-se a experiência adquirida ao longo do tempo na monitoração de redes elétricas com os sistemas SCADA.

O fato de que as medidas convencionais são assíncronas, impossibilita a obtenção direta dos valores de fase das tensões complexas das barras monitoradas. A associação deste fato à lenta taxa de atualização, na ordem de 2 a 10 segundos, resulta em uma limitação para operação em tempo real à medida que o sistema se expande, e consequentemente tem sua complexidade elevada.

Por essa razão a crescente expansão dos sistemas interligados incentivou os estudos para implementação de um novo sistema de monitoração, com o propósito de suprir a necessidade de contar com medidas síncronas, e ainda obtidas com uma taxa de amostragem e exatidão muito superiores quando comparadas às medidas oriundas do sistema SCADA. Este novo esquema é denominado SMFS, e será apresentado na seção seguinte.

2.3 Sistema de Medição Fasorial Sincronizado

Como mencionado acima, o constante crescimento dos sistemas interligados de energia elétrica juntamente com o avanço da tecnologia incentivaram a criação de métodos que possibilitam a medição direta do ângulo de fase da tensão das barras monitoradas do sistema. Os primeiros estudos neste sentido foram realizados na década de 80.

O progresso em duas áreas foram essenciais para viabilizar a elaboração do SMFS. Uma destas áreas é a Proteção computadori-

zada de Sistemas de Potência [5]. Uma grande evolução nos algoritmos de alta precisão para o cálculo de componentes simétricas ocorreu devido ao desenvolvimento do relé de proteção SCDR (da sigla em Inglês para *Symmetrical Component Distance Relay*). Tempos depois, este fato proporcionaria a sincronização das medidas em subestações distantes [31].

As técnicas de sincronização via satélite constituíram-se em outra evolução de grande relevância para o SFMS. Dentre estas técnicas destaca-se principalmente a ativação e disponibilização para uso comercial do sistema GPS (da sigla em Inglês para *Global Positioning System*). Trata-se de um sistema baseado em satélites que provê posição e tempo, inicialmente utilizado apenas para fins militares [32].

Portanto, o SMFS pode ser definido como um sistema de medição de grandezas elétricas capaz de adquirir medidas sincronizadas em relação ao tempo, ainda que as instalações/equipamentos se encontrem distantes geograficamente. A sincronização é realizada com base em uma referência absoluta de tempo (UTC¹) derivada de um receptor GPS. Estas medidas são processadas e disponibilizadas na forma de fasores [34].

2.3.1 Arquitetura do sistema de medição fasorial sincronizado

A Figura 2.2 [7] ilustra uma arquitetura típica de um SMFS.

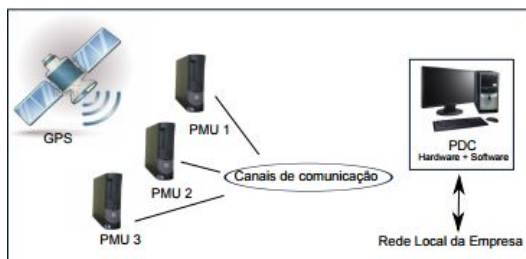


Figura 2.2 – Arquitetura típica de um SMFS

Um sistema de medição fasorial sincronizado é basicamente formado por quatro elementos:

¹O *Coordinated Universal Time* representa a hora do dia no meridiano primal da Terra (0° de longitude) [33]

1. PMU;
2. Sistema de Sincronização;
3. Canais de Comunicação;
4. Concentrador de Dados Fasoriais, ou PDC (da sigla em Inglês para *Phasor Data Concentrator*).

A seguir são apresentadas as funções, e atividades exercidas por cada um dos elementos básicos de um SMFS.

Phasor Measurement Unit:

Sendo alimentada pelos enrolamentos secundários de TC's e TP's, a PMU é o elemento encarregado de mensurar os sinais analógicos de tensões e correntes. As medidas são processadas no próprio equipamento e são convertidas em fasores a taxas que variam de 10 a 60 sincrofasores por segundo [35]. Após a conversão, os dados são transferidos para o concentrador de dados. A Figura 2.3 [7] ilustra uma estrutura genérica de uma PMU, composta basicamente por: um filtro *anti-aliasing*², um módulo GPS com antena receptora, um conversor analógico/digital (A/D) e um microprocessador.

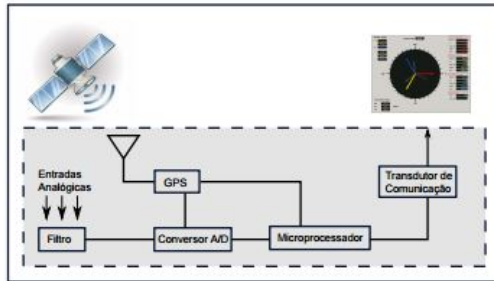


Figura 2.3 – Estrutura genérica de uma PMU

O procedimento para obtenção dos fasores de corrente e tensão tem início com a filtragem dos sinais amostrados, com o intuito de

²Processo de filtragem de um sinal quando da conversão em um formato de amostra para remover os componentes desse sinal cuja frequência seja igual ou maior do que 0,5 da taxa de Nyquist. Se não removidos, esses componentes podem aparecer como um componente de menor frequência (uma falsa frequência - “alias”) [33]

evitar efeitos de *aliasing*. Para isso é utilizada uma taxa de amostragem superior à taxa de Nyquist, que é duas vezes o mais alto componente de frequência que se deseja medir em um sinal analógico de entrada [33]. A definição dessa taxa de amostragem permite que estes sinais sejam discretizados pelo conversor A/D fornecendo uma representação fiel de sua forma digital.

Essa amostragem possui uma referência temporal obtida a partir de um sinal de um pulso por segundo (PPS). Este sinal consiste em um trem de pulsos retangulares ocorrendo em uma frequência de 1 Hz, com a borda crescente sincronizada em segundos UTC [33]. Estes sinais gerados por receptores GPS fornecem os instantes de amostragem [4].

Na etapa seguinte, os microprocessadores realizam o tratamento matemático. Diversas abordagens podem ser adotadas neste momento, porém uma das mais eficientes é a transformada discreta de Fourier (ou DFT, da sigla em Inglês para *Discrete Fourier Transform*) na sua forma recursiva [4].

Por fim, os dados são formatados em pacotes padronizados e transmitidos para o PDC, juntamente com suas respectivas etiquetas de tempo, via canal de comunicação [36].

O fato de que as PMUs são produzidas por diversos fabricantes faz com que possam apresentar configurações distintas, principalmente no que diz respeito à quantidade dos canais de medição. Além disso, podem existir equipamentos que além de medir o fasor de tensão da barra na qual estão instalados, também são capazes de mensurar os fasores de corrente de um, dois, ou até mais ramos incidentes nesta barra monitorada pela PMU.

Sistema de Sincronização:

Tem como finalidade sincronizar o processo de cálculo dos fasores. Para isso, ele é conectado à PMU usando como referência as técnicas via satélite, geralmente o GPS. Assim, o sistema de sincronização permite que as medidas observadas em cada uma das PMUs sejam feitas simultaneamente, e dessa forma garante-se que todas as medições de frequência, tensão e corrente adquiridas e calculadas em um determinado momento estejam em uma mesma referência temporal.

Ainda que o sistema GPS seja o mais utilizado, podemos citar outras técnicas de sincronização via satélite, tais como: o sistema *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), que assim como o GPS é um sistema estadunidense; o sistema russo *Global Navigation Satellite System* (GLONASS); o sistema europeu *Galileo*, e também o

sistema chinês *Beidou-Compass*.

Com o intuito de certificar a confiabilidade das medidas fasoriais da rede elétrica, o IEEE criou uma padronização onde certos requisitos devem ser satisfeitos. As seguintes normas se aplicam: IEEE Std C37.118.1-2011 [37], atualmente substituída pela IEEE Std C37.118.1a-2014 [38] que determina a condição mínima de desempenho das PMUs tanto em regime permanente quanto dinâmico; IEEE Std C37.118.2-2011, que define as exigências para a transferência de dados de medição para SEP, definindo o tipo de mensagem, o conteúdo e como é utilizado [39].

O sistema GPS é o único a atender todos os níveis de qualidade requeridos pelas normas, desde 2005 [5] até os padrões atuais, sendo portanto o sistema mais utilizado até os dias de hoje. Ele é composto por 24 satélites e 31 estações de controle que fornecem informações como posição e tempo.

O sinal de um PPS fornecido pelo GPS é o que garante que todas as PMUs instaladas no sistema efetuem suas medições simultaneamente, mantendo a mesma referência angular para todos os fasores calculados. O SMFS exige que a fonte de sincronismo seja confiável e apresente uma precisão de tempo que atenda aos requisitos de diversas aplicações. Considerando uma frequência de 60Hz, um erro de tempo de $1\mu\text{s}$ corresponde a um erro da ordem de $0,022^\circ$ elétricos na medição fasorial. Portanto, a exatidão das medidas fasoriais obtidas a partir da sincronização via GPS é plenamente satisfatória para os sistemas elétricos de potência, uma vez que o sinal de tempo PPS apresenta uma precisão da ordem de 100 nanosegundos [40].

Canais de Comunicação:

São os canais responsáveis pelas trocas de dados, tanto entre as PMUs e o concentrador de dados fasoriais, como também entre PDCs de diferentes áreas. Esse intercâmbio de informações geralmente é realizado através da Internet ou de rede corporativa da empresa. O canal de comunicação é selecionado de acordo com a necessidade da aplicação, relacionada com a taxa de transferência e a segurança do recebimento de dados [35].

Concentrador de Dados Fasoriais:

Este é o elemento que recebe os dados de cada uma das PMUs e os organiza através das etiquetas de tempo, ou seja, ordena os dados

de acordo com data e horário das medições. Dessa maneira o dispositivo agrupa as informações que correspondem a um mesmo instante de tempo. Por fim, disponibiliza e distribui os dados de medição fasorial para diversas aplicações, podendo ser tanto em tempo real quanto para estudos *offline* [41].

2.3.2 Aplicação da medição fasorial sincronizada nos sistemas elétricos de potência

Inúmeras são as opções de aplicação da medição fasorial no SEP. A estimação de estados não é sua principal aplicação, mas tendo em vista o gradual mas crescente número de PMUs instaladas nos sistemas elétricos de potência, acabam por disponibilizar cada vez mais medidas fasoriais que podem fornecer importantes subsídios para instrumentar a monitoração em tempo real da operação da rede elétrica. Consequentemente, também se abrem novas perspectivas para a estimação de estados e a análise da segurança do sistema.

Exemplificando algumas aplicações de medidas fasoriais sincronizadas nos SEP, temos: sistemas especiais de proteção; controle de amortecimento de oscilações; análise de perturbações; sistemas de proteção adaptativa; otimização de controladores; predição de estabilidade transitória e de colapsos de tensão; estimação de estados, entre outros [42].

2.4 Conclusão

Neste capítulo são expostas as principais características dos sistemas de monitoração e sensoriamento que servem como fonte de dados para a EESP. É evidente a grande diferença entre o funcionamento dos sistemas e também quão distintas são as propriedades das medições adquiridas por cada um destes sistemas.

Por este motivo, a ideia subjacente a esta dissertação é trabalhar com a integração das duas classes de medidas. Aproveita-se desta forma as melhores características das quantidades convencionais e fasoriais, contribuindo para uma melhoria significativa nos resultados obtidos na EESP.

Com o propósito de alcançar este objetivo, é adotada a fusão de estimativas para combinar as informações SCADA e fasoriais. O fato de que a estratégia utiliza um módulo de estimação para cada classe de

medida a ser processada possibilita o aproveitamento do nível superior de exatidão das quantidades fasoriais sem abrir mão da confiabilidade e simplicidade dos sistemas SCADA, cujas medidas são processadas por estimadores convencionais já existentes nos centros de operação.

3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.1 Introdução

A EESP desempenha um papel de suma importância para garantir a segurança da operação de sistemas elétricos de potência. Ela é a função destinada a disponibilizar informações confiáveis a respeito do ponto de operação atual do sistema, sendo por consequência essencial na atualização em tempo real do banco de dados do sistema.

Essa base de dados é fornecida a partir das telemidas adquiridas pelas fontes de dados para EESP. Após o processamento das medidas pelo estimador de estados, valores para tensões complexas são estimadas para todas as barras do sistemas. As magnitudes e ângulos de fase das tensões complexas dos nós da rede elétrica são consideradas as variáveis de estado do sistema elétrico em regime permanente. A posse destas variáveis viabiliza a determinação das outras grandezas do sistema, tais como injeções de potência nas barras, fluxo de potência nas linhas de transmissão, entre outros. Essas informações são necessárias para análise e monitoração da segurança do sistema [3].

O processo da estimação de estados abrange alguns subproblemas, como por exemplo:

- **Observabilidade da rede:** este conceito será melhor elaborado na Seção 3.3, mas consiste basicamente em verificar se o número e a localização das telemidas são suficientes para permitir a determinação dos estados do sistema;
- **Processamento de Erros Grosseiros (EGs):** o processamento de EGs em telemidas do plano de medição engloba outros três subproblemas: detecção, identificação e recuperação de erros grosseiros. O Capítulo 5 desta dissertação, trata do processamento de EGs.

Diversas abordagens podem ser utilizadas no decorrer das etapas do processo de EESP. Primeiramente, ao se estabelecer o modelo de medição, há a possibilidade de adoção de modelos lineares ou não-lineares. A Seção 3.4 detalha como é modelada a EESP a partir de um modelo de medição não linear.

Outra grande diferença na maneira em que é tratado a estimação de estados está na formulação analítica do problema. Os métodos

encontrados na literatura são os estimadores do tipo Mínimos Valores Absolutos Ponderados (MVAP) e a formulação baseada na minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos. Outras formas de critérios não-quadráticos têm sido também propostos [43–45]. Por ser a abordagem mais utilizada, o método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) é a estratégia adotada neste trabalho. A Seção 3.5 é dedicada a apresentar esta formulação.

Variados são os algoritmos de otimização capazes de solucionar o problema de MQP que modela a EESP desta dissertação. Podem ser citados:

- Método Clássico, o qual consiste em resolver a equação normal de Gauss através do processo iterativo de Newton, sendo portanto conhecido como Método de Gauss-Newton [1, 5, 7, 46];
- Utilização de estimadores desacoplados, explorando o desacoplamento $P\delta - QV$ [1, 2, 47];
- Método de Hachtel, que possui outras duas denominações, método da matriz aumentada ou do *Tableau* esparso [1, 2, 48];
- Métodos ortogonais como por exemplo reflexões de Householder, rotações de Givens, etc [3, 49, 50];
- Métodos Híbridos que utilizam a fatoração ortogonal combinada à solução do sistema linear não-ortogonal [1, 2, 51].

A estratégia escolhida para solucionar os problemas da EESP contidos neste trabalho baseia-se no primeiro dos métodos citados. Em que pesem algumas desvantagens quanto à sua robustez numérica, o Método Clássico é capaz de resolver problemas de otimização de grandes dimensões dentro de um curto intervalo de tempo. Estes são fatores relevantes na obtenção dos resultados da EESP, já que são necessárias soluções precisas em pequenos intervalos de tempo, para que seja possível atualizá-los em tempo real. Outro ponto considerado foi a capacidade deste método para processar erros grosseiros de uma maneira satisfatoriamente eficaz. O desenvolvimento deste algoritmo é apresentado na Seção 3.6.

Finalmente, a Seção 3.7 finaliza apontando as ideias principais discutidas no decorrer deste capítulo.

3.2 Medidas Utilizadas na EESP

O conjunto de telemidas oriundas das fontes de dados e processadas pelos estimadores de estado é listado a seguir:

- Módulo de tensões nodais (medidas convencionais) - $|V|$;
- Injeções de potência ativa nas barras (medidas convencionais) - P ;
- Injeções de potência reativa nas barras (medidas convencionais) - Q ;
- Fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão (medidas convencionais) - T ;
- Fluxo de potência reativa nas linhas de transmissão (medidas convencionais) - U ;
- Magnitude de corrente nos ramos (medidas convencionais) - I^{conv} ;
- Módulo de tensões nodais (medidas fasoriais) - $|\tilde{V}|$;
- Ângulo de fase das tensões nodais (medidas fasoriais) - θ ;
- Parte real da corrente dos ramos (medidas fasoriais) - I_{re} ;
- Parte imaginária da corrente dos ramos (medidas fasoriais) - I_{im} .

A partir do conhecimento sobre os tipos de medidas utilizadas pela estimação de estados, é possível agora descrever o problema de observabilidade de redes elétricas.

3.3 Observabilidade da Rede Elétrica

O problema da observabilidade da rede elétrica consiste essencialmente em determinar se as medidas que compõem um certo plano de medição, fornecem informação suficiente para viabilizar a estimação de estados. Ela é determinada tanto pelo tipo e localização das telemidas que integram o plano de medição como pela topologia do sistema fornecida pelo configurador de redes.

A determinação da observabilidade do sistema é uma ferramenta muito valiosa para o projeto do plano de medição, tendo em vista que

através dos algoritmos de análise de observabilidade torna-se possível identificar as deficiências dos planos de medição, e ainda indicar reforços para os pontos necessários. Vale salientar que falhas de equipamentos, erros de medição ou telecomunicação, e até mudanças na topologia da rede podem acarretar na perda da observabilidade, o que realça a importância da execução regular dos aplicativos de análise de observabilidade de redes.

Os algoritmos utilizados durante a realização deste trabalho para verificação da observabilidade dos planos de medição são baseados na formulação do problema de observabilidade topológica em termos do grafo de medição do sistema, associado a um dado plano de medição. Esta rotina é derivada de [52] e foi utilizada em planos de medição relacionados apenas às medidas convencionais. Para as medições fasoriais sincronizadas, foi utilizada a rotina desenvolvida em [35, 53].

A falta de observabilidade não impede necessariamente a estimação de estados, já que existem algumas maneiras para contornar essa situação. Entre as mais comuns estão a utilização de pseudomedidas ou informações *a priori* [7].

Pseudomedidas são quantidades cujos valores encontram-se disponíveis sem a utilização de instrumentos de medição, como por exemplo injeções de potência em barras de transferência. Outros tipos de pseudomedidas podem ser obtidos a partir de estudos de previsões de carga, dados de projeto ou até mesmo de resultados de estimações anteriores [7].

Já as informações *a priori* são dados previamente disponíveis sobre os valores das variáveis de estado [29]. Nos estudos de caso tratados nesta dissertação, a não observabilidade dos planos de medição é contornada com a utilização de informações *a priori*, assim como em [5, 7, 13]. A Seção 3.6 destinada ao método da equação normal descreve como é matematicamente realizada a inclusão destas informações na solução do problema de estimação de estados.

Independentemente da estratégia utilizada, as variâncias de pseudomedidas e informações *a priori* devem refletir o grau de incerteza a elas associado. Geralmente estas variâncias são maiores quando comparadas às das telemidas provenientes de sistemas de monitoração e sensoriamento.

Com a observabilidade do sistema já verificada, é estabelecido o modelo de medição para a formulação do processo de estimação de estados.

3.4 Modelo de Medição Não Linear

Considere um sistema de potência constituído por N barras e NL linhas de transmissão, no qual m quantidades são medidas. O número de variáveis de estado neste caso é:

$$n = 2N - 1 \quad (3.1)$$

note que esse número é obtido ao somar a quantidade de módulos e ângulos de tensões nodais que precisam ser calculados. A magnitude de tensão é calculada para todas as N barras do sistema, enquanto que o ângulo é calculado para $N - 1$ barras, já que o valor do ângulo de fase da tensão na barra de referência é conhecido (0°).

O conjunto de m medidas e os erros de medição estão relacionados através do seguinte modelo [2, 20–22]:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \eta \quad (3.2)$$

onde:

\mathbf{z} é o vetor de ordem $m \times 1$ das quantidades medidas;

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$ é o vetor de ordem $m \times 1$ composto por funções não lineares do estado do sistema, resultantes da aplicação das leis de Kirchhoff e Ohm;

\mathbf{x} é o vetor de estados, de ordem $n \times 1$;

η é o vetor $m \times 1$ que modela os erros aleatórios de medição.

Supõe-se que, dentro de circunstâncias normais, a magnitude do erro do instrumento de medição está relacionada à sua classe de exatidão, e por consequência está contido em uma faixa tolerável sem deteriorar a quantidade medida. Adicionalmente, supõe-se que o vetor dos erros de medição apresenta a distribuição normal, com média zero e matriz de covariância \mathbf{R} . Presume-se também que o erro de um medidor não afeta a quantidade medida por outro instrumento de medição. Por isso, a matriz \mathbf{R} é considerada diagonal.

Associando estas suposições com a Equação (3.2), encontra-se o seguinte modelo de medição:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \eta \quad (3.3)$$

$$E(\eta) = 0$$

$$E(\eta\eta^t) = \mathbf{R}$$

onde \mathbf{R} é uma matriz diagonal composta pelas variâncias dos erros de medição. O fato desta matriz ser diagonal, indica que os erros de

medição são não correlacionados.

Uma informação de grande relevância para avaliar o desempenho dos estimadores é o índice de redundância global, obtido através da relação entre a quantidade de medidas que constituem o plano de medição e o número de variáveis de estado, conforme segue:

$$\rho = \frac{m}{n} = \frac{m}{2N - 1} \quad (3.4)$$

Esse índice está vinculado à dimensão do sistema em si, e também ao número de medidas que compõem o plano de medição. Para que não exista a necessidade de se utilizar pseudomedidas ou informações *a priori* a fim de contornar a falta de observabilidade, a quantidade de medidas que constituem o plano de medição deve ser igual ou superior ao número de variáveis de estado do sistema. Isso quer dizer que o índice deve ser maior ou igual a um ($\rho \geq 1$).

Além de uma boa redundância global ($\rho \geq 1,7$), é importante que as medidas do plano de medição estejam adequadamente distribuídas pela rede elétrica. Desta maneira, são favorecidos tanto a estimação quanto o processamento de erros grosseiros.

Com o modelo de medição estabelecido, é possível executar a formulação analítica do problema via método dos mínimos quadrados ponderados.

3.5 Formulação Matemática via Método MQP

O método MQP estima o vetor $\hat{\mathbf{x}}$ para os estados. Essa estimativa é calculada de forma a minimizar a função-objetivo baseada no modelo de medição apresentado na Equação (3.3). Dessa forma, a solução do problema consiste na minimização com relação a $\hat{\mathbf{x}}$ da seguinte função:

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})]^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] \quad (3.5)$$

$$= \sum_{i=1}^m R_{ii}^{-1} [z_i - h_i(\hat{x})]^2 \quad (3.6)$$

onde $\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ representa o vetor dos resíduos de estimação.

Os valores dos resíduos de estimação são calculados a partir da diferença entre o valor medido pelos instrumentos e a quantidade obtida em função do estado estimado. Portanto, a função-objetivo da Equação

(3.5) representa o somatório dos quadrados dos resíduos, ponderados pelos inversos das variâncias dos respectivos erros de medição.

Essa ponderação realizada por \mathbf{R} tem um papel extremamente importante na solução deste problema de otimização, uma vez que sua participação na função implica em que as medidas de menor variância (que possuem maior exatidão) recebem um peso maior quando comparadas às medidas de maior incerteza. Desta forma, as quantidades que recebem os maiores pesos na solução da estimação de estados são justamente as que apresentam menores níveis de incerteza.

É justamente essa ponderação que permite trabalhar com diferentes classes de medidas, ou ainda com a inclusão de pseudomedidas e informações *a priori*. Desde que todas as medidas sejam corretamente ponderadas, a fusão dessas quantidades não prejudicará a precisão dos resultados alcançados.

Com a formulação já finalizada, resta agora apresentar o método de solução deste problema de otimização. Como já citado anteriormente, o caminho para solução escolhido é através do método clássico baseado na equação normal de Gauss.

3.6 Solução da EESP via Método da Equação Normal

Conforme visto na Seção 3.5, a EESP formulada através do Método de Mínimos Quadrados Ponderados é representado pelo problema de otimização a seguir:

$$\min_{\hat{\mathbf{x}}} J(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})]^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] \quad (3.7)$$

A condição de otimalidade deste problema é expressa por:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] = 0 \quad (3.8)$$

onde:

$\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}}$ é a matriz de primeiras derivadas das funções não lineares do vetor $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, calculada no ponto representado pelo vetor $\hat{\mathbf{x}}$ dos estados estimados.

Mesmo que o problema de otimização indicado na Equação (3.7) não envolva restrições, a solução ótima não é algo simples a ser obtido.

Ainda que o índice a ser otimizado seja uma função quadrática, ela é expressa em termos de um vetor de equações não lineares que

relaciona os estados às quantidades medidas. Outro fato que dificulta a solução é que a condição de otimalidade representada pela Equação (3.8), é fortemente não linear e não apresenta uma solução fechada. Deste modo há a necessidade da utilização de métodos iterativos para solução do problema.

Essas duas situações combinadas incentivam a utilização do método de Gauss-Newton para solucionar o problema, uma vez que a natureza quadrática da função objetivo aliada à ausência de restrições torna esta ferramenta iterativa a mais apropriada dentre outras possíveis opções. Existem duas abordagens para iniciar esta solução. A primeira alternativa é relatada na sequência.

Por se tratar de um método iterativo, há a necessidade de que a estimativa corrente do vetor de estado seja atualizada mediante correções sucessivas, calculadas através da seguinte fórmula:

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x} \quad (3.9)$$

Para determinar $\Delta \mathbf{x}$, que representa a correção dos estados estimados, é inicialmente realizada a linearização das equações de $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ em torno do ponto $\hat{\mathbf{x}}^k$ ao longo da direção $(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k)$, ou seja:

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x}) \approx \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) + \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k) \quad (3.10)$$

A substituição desta expressão no modelo não linear apresentado pela Equação (3.2), resulta em:

$$\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k) + \eta \quad (3.11)$$

Desta maneira, o modelo de medição linearizado pode ser descrito na seguinte forma compactada:

$$\Delta \mathbf{z} = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x} + \eta \quad (3.12)$$

$$E(\eta) = 0 \quad E(\eta \eta^t) = \mathbf{R}$$

onde:

$\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k)$ é o vetor dos resíduos de medição e;

$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k)$ é o valor da correção dos estados estimados a cada iteração.

Após a linearização do modelo, a função-objetivo do problema de MQP passa a ser expressa da seguinte maneira:

$$J(\Delta \mathbf{x}) = [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}]^t \mathbf{R}^{-1} [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}], \quad (3.13)$$

resultando em uma nova condição de otimalidade dada por:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \Delta \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}] = 0 \quad (3.14)$$

Outra maneira de apresentar essa nova condição de otimalidade é:

$$[\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} \quad (3.15)$$

A expressão (3.15) é denominada Equação Normal de Gauss e representa o sistema linear a ser resolvido a cada iteração, que determinará o valor do incremento, ou correção, do vetor de estado $\Delta \mathbf{x}$.

Pode-se obter essa mesma equação percorrendo outro caminho. Esta outra forma de encontrar a equação normal de Gauss parte da expansão do problema de MQP da Equação (3.7) em série de Taylor até o termo de segunda ordem. Desta forma, a função-objetivo é expandida em torno do ponto $\hat{\mathbf{x}}^k$ e ao longo da direção $\Delta \mathbf{x}$. Logo:

$$J(\hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x}) = J(\hat{\mathbf{x}}^k) + \left. \frac{\partial J(\mathbf{x})^t}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^t \left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} \quad (3.16)$$

onde:

$\left. \frac{\partial J(\mathbf{x})^t}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k}$ é o vetor de primeiras derivadas da função $J(\mathbf{x})$ com relação a variável \mathbf{x} ;

$\left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k}$ é a matriz de segundas derivadas da função $J(\mathbf{x})$ com relação a variável \mathbf{x} .

Tanto o vetor quanto a matriz acima são calculados no ponto que representa a estimativa corrente ($\hat{\mathbf{x}}^k$). O mínimo da função estabelecida pela Equação (3.16) é obtido diferenciando-se $J(\hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x})$ em relação a $\Delta \mathbf{x}$ e igualando a solução a zero. Portanto:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \Delta \mathbf{x}} &= \left. \frac{\partial J(\mathbf{x})^t}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} + \left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} = 0 \\ \left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} &= - \left. \frac{\partial J(\mathbf{x})^t}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} \end{aligned} \quad (3.17)$$

O vetor gradiente $\left. \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k}$ é dado por:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} &= \left(\frac{\partial \{[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]\}}{\partial \mathbf{x}} \right) \bigg|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \\ &= -2 \left(\frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right)^t \bigg|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \quad (3.18) \\ &= -2\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} \end{aligned}$$

Agora, o mesmo procedimento é aplicado para o cálculo da matriz Hessiana das segundas derivadas de $J(\mathbf{x})$:

$$\left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left[-2 \left(\frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right)^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \right]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \quad (3.19)$$

A aproximação de Gauss consiste em desprezar a segunda derivada de $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ que aparece na derivação da Equação (3.19). Isto significa dizer que, próximo ao ponto de solução, as variações da matriz $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ são praticamente nulas. Ao considerar esta aproximação, a Equação (3.19) resulta em:

$$\left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \approx 2\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \quad (3.20)$$

Dessa forma, a Equação (3.17) pode ser reescrita como:

$$[\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} \quad (3.21)$$

que é exatamente a mesma expressão obtida através do modelo de medição linearizado, representada pela Equação (3.15).

A partir da equação normal de Gauss, é obtida a matriz ganho ou de informação. Esta é discutida em seguida, juntamente com suas principais propriedades.

3.6.1 Matriz ganho ou informação

O nome Matriz Ganho ou de Informação como é comumente conhecida, é a nomenclatura utilizada para a matriz de coeficientes da equação normal de Gauss [1], anteriormente representadas nas expres-

sões (3.15) e (3.21). Portanto, a Matriz de Informação é dada por:

$$\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \quad (3.22)$$

onde, conforme visto na formulação analítica, $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)$ é a matriz Jacobiana do modelo de medição linearizado e \mathbf{R} é a matriz de covariância dos erros de medição.

A matriz Ganho possui algumas propriedades importantes. Ela é simétrica em estrutura e valores numéricos ($\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{G}^t(\hat{\mathbf{x}}^k)$), de ordem $n \times n$, e também é positiva semidefinida [2]. Essas propriedades facilitam sua fatoração. Para um sistema observável com respeito ao plano de medição, ela é singular e definida positiva.

Adicionalmente, a matriz Ganho cumpre funções importantes tanto no processamento de erros grosseiros como também na fusão de estimativas. Para esta última, a matriz Ganho é utilizada na ponderação das estimativas obtidas a partir de cada uma das classes de medidas, possibilitando que bons resultados sejam obtidos nesta etapa. Uma demonstração acompanhada de uma análise mais profunda sobre o tema estão relatadas no Capítulo 4. Já com respeito ao processamento de erros grosseiros, é possível obter outras duas matrizes de grande relevância para esta etapa, são elas:

$$\mathbf{P}(\hat{\mathbf{x}}^k) = [\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)]^{-1} \quad (3.23)$$

que representa a matriz de covariância dos erros de estimação [20, 21], que permite avaliar o espalhamento destes erros após a solução ter sido obtida. Note que, ao compará-la com a Equação (3.22), é evidente que ela é obtida a partir do inverso da matriz Ganho ($\mathbf{P}(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^k)^{-1}$).

Outra matriz de extrema importância no processamento de erros grosseiros é a denominada matriz de covariância dos resíduos, representada pela seguinte expressão [54–56]:

$$\mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{R} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{P}(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \quad (3.24)$$

Ambas as matrizes \mathbf{P} e \mathbf{W} serão novamente abordadas no Capítulo 5, que trata especialmente da etapa de processamento de erros grosseiros.

3.6.2 Aspectos computacionais e algoritmo

Este tópico aborda os aspectos computacionais referentes a rotina da solução do problema de otimização via Método Clássico, e por fim sumariza o algoritmo correspondente em alguns passos.

Soluções eficientes da equação normal de Gauss procuram explorar as propriedades já citadas da matriz Ganho. Sua simetria tanto em relação a estrutura bem como a valores numéricos, e sua característica de ser uma matriz positiva definida quando o sistema for observável, aliam-se ao fato que a esparsidade de \mathbf{H} faz com que a matriz de informação possua um baixo número de elementos não nulos, possibilitando o uso de técnicas de compactação e esparsidade. Esse conjunto de características facilitam a sua fatoração [57].

Portanto, para solução do sistema linear que a equação normal de Gauss representa, é adotado o seguinte procedimento. Primeiramente a matriz ganho é fatorada via método de Cholesky ($\mathbf{G} = \mathbf{L}\mathbf{L}^t$) [2, 58]. Em seguida é realizada a substituição direta para resolver $\mathbf{L}\mathbf{y} = \mathbf{b}$, onde $\mathbf{b} = \mathbf{H}^t \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z}$, a fim de obter \mathbf{y} . Finalmente é realizada a substituição inversa para resolver $\mathbf{L}^t \Delta \mathbf{x} = \mathbf{y}$ para a obtenção de $\Delta \mathbf{x}$.

Outros dois aspectos reduzem o esforço computacional do método. Primeiro, o fato de a estrutura da matriz de informação não ser modificada no decorrer do processo iterativo. Portanto, sua ordenação também pode ser determinada uma única vez. O outro aspecto está ligado ao fato de que nas últimas iterações do processo, as variações nos valores numéricos na matriz \mathbf{H} são praticamente desprezíveis, permitindo manter essa matriz constante durante algumas iterações.

Estas são as principais características com relação ao esforço computacional realizado pelo método. O algoritmo correspondente pode ser sumarizado através dos seguintes passos:

1. Determinar a estrutura das matrizes Jacobiana e de informação, e também a ordenação da matriz de informação;
2. Arbitrar uma estimativa inicial para o vetor de estados $\hat{\mathbf{x}}^0$;
3. Calcular os valores numéricos de: $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)$, $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^k)$, $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k)$ e $\mathbf{b} = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z}$;
4. Fatorar a matriz de informação;
5. Resolver o sistema linear $\mathbf{L}\mathbf{L}^t \Delta \mathbf{x}^k = \mathbf{b}$;
6. Atualizar o vetor de estados: $\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x}^k$;

7. Verificar convergência: se $\max|\Delta x_i^k| \leq \epsilon$, calcular os fluxos de potência nos ramos e as injeções de potência nas barras e finalizar o processo iterativo (neste trabalho $\epsilon = 10^{-5} pu$). Caso contrário, seguir para o próximo passo;
8. Fazer $k = k + 1$ e retornar ao passo 3.

3.6.3 Inclusão de informações *a priori*

No decorrer dos estudos de caso presentes neste trabalho, em algumas situações os planos de medição podem tornar-se não-observáveis com relação a uma das classes de medida. Como já informado, a estratégia adotada para contornar esse cenário é a utilização de informações *a priori*. Este tópico tem o objetivo de demonstrar como é realizada esta inclusão junto ao método da equação normal.

Considerando a Equação (3.5), o seguinte termo deve ser adicionado à função-objetivo [59]:

$$\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^t \mathbf{P}_{ap}^{-1}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (3.25)$$

onde $\bar{\mathbf{x}}$ é o vetor ($n \times 1$) de informações *a priori* das variáveis de estado e \mathbf{P}_{ap} , que possui ordem $n \times n$, simboliza a matriz de covariância das informações *a priori*.

Considerando a função-objetivo aumentada, a aplicação condições de otimalidade nos leva a seguinte equação [59]:

$$[\mathbf{H}^t \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{P}_{ap}^{-1}] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^t \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} + \mathbf{P}_{ap}^{-1} \Delta \bar{\mathbf{x}} \quad (3.26)$$

onde $\Delta \bar{\mathbf{x}} = (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^k)$.

Portanto, para as situações em que seja necessária a inclusão de informações *a priori* é a Equação (3.26) que deve ser solucionada a cada iteração.

3.7 Conclusão

O processo da estimação de estados em sistemas de potência envolve diversas etapas. Após a discussão relacionada às principais fontes de dados para EESP, os conceitos fundamentais relacionados à formulação e solução do problema de estimação de estados são introduzidos neste capítulo.

Inicialmente são descritas as medidas que são adquiridas pelos sistemas de telemedicação e processadas pelos estimadores. Além das medidas e antes de adentrar no problema de estimação em si, apresenta-se o conceito de observabilidade da rede elétrica, e também sua importância dentro do processo de estimação de estados.

A formulação do problema inicia pela formação do modelo de medição não-linear do sistema. Na sequência, é apresentada a formulação analítica do problema de EESP via método MQP. A abordagem adotada para a solução da EESP, é o método clássico. Além de sua formulação, discute-se também a importância da matriz ganho no processo de solução bem como as principais vantagens computacionais fornecidas por este método. Adicionalmente, discute-se um aspecto extremamente importante para os casos que precisam contornar os problemas da falta de observabilidade da rede. Isto conduz ao conceito de informações *a priori* sobre as variáveis de estado bem como sua inserção na formulação do problema MQP, e também como é realizada sua inclusão no processo de solução da EESP via método clássico.

Após apresentação deste conteúdo, o próximo capítulo aponta como é realizada a inclusão de medidas fasoriais sincronizadas na estimação de estados, utilizando técnicas de fusão de dados.

4 INCLUSÃO DE MEDIDAS FASORIAIS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

4.1 Introdução

A crescente penetração de PMUs nos sistemas elétricos de potência associada ao nível de exatidão e à taxa de amostragem na qual são adquiridas as medidas fasoriais, estimulou o interesse na integração destas medidas na estimação de estados, combinando-as com os dados oriundos do sistema SCADA.

Diversas propostas nesse sentido têm sido apresentadas. Dentre elas, as estratégias mais conhecidas são:

- Estimadores de estados baseados apenas em medidas fasoriais;
- Estimadores de estados centralizados (estimadores híbridos);
- Estimadores de estados baseados em múltiplos estágios.

Entre as técnicas citadas, os estimadores de estados baseados em múltiplos estágios se destacam em relação às demais, sendo por este motivo a estratégia utilizada neste trabalho. Esta escolha é baseada em suas atrativas características quando levado em conta o atual cenário dos sistemas elétricos de potência. As principais vantagens em processar as medidas convencionais e fasoriais em estimadores distintos são:

- Preserva-se inteiramente a estrutura já consolidada da estimação de estados convencional, sem que seja necessário modificar ou conhecer detalhes da implementação dos estimadores existentes;
- A utilização de um módulo de medição apenas para medidas fasoriais permite o uso de estimadores de estado lineares, que são mais rápidos e eficientes. A formulação matemática para esta situação é apresentada em [6];
- O requisito de observabilidade da rede elétrica com respeito às medidas fasoriais pode ser relaxado.

O método adotado para integração das duas classes de medidas é fundamentado na teoria da fusão de dados com múltiplos sensores. Essa abordagem, proposta em [5, 13], utiliza os conceitos da fusão de

dados para combinar os dois vetores de estados estimados gerados pelos distintos estimadores. A teoria da Fusão de Estimativas [60, 61] garante a combinação ótima dos estados estimados a partir dos planos de medição convencional e fasorial.

Os conceitos e ferramentas necessários para o alcance dos objetivos acima são explanados na sequência deste capítulo, desde a arquitetura dos sistemas de fusão de dados até a formulação matemática do problema. Além disso, ainda é discutida a aplicação do método a sistemas elétricos de potência.

4.2 Fusão de Dados com Múltiplos Sensores

Esta técnica tem por objetivo combinar dados de vários sensores a fim de aprimorar a qualidade das informações disponibilizadas por um único sensor. Apesar de ter sua origem ligada a aplicações militares [60, 62], os sistemas de fusão de dados com múltiplos sensores são também utilizados na medicina [61, 62], robótica [63], processos industriais [60, 64], entre outras aplicações.

Uma analogia dessa estratégia pode ser feita com a forma como os seres humanos utilizam diferentes sentidos (visão, tato, olfato, paladar) para interagir com o ambiente à sua volta [60, 61]. Neste caso os sentidos funcionam como os sensores, e a combinação das informações permitem que o ser humano tenha uma percepção final do meio onde está inserido.

Algumas das melhorias proporcionadas pela fusão de dados com múltiplos sensores são [61, 65]:

- O maior número de sensores viabiliza uma maior cobertura espacial do sistema;
- Fornecimento de taxas de amostragem mais elevadas do que as obtidas com apenas um sensor, alcançadas através da combinação coordenada dos sensores;
- Redução do nível de incerteza e aumento da precisão das informações quando comparadas às oferecidas por apenas um sensor;
- Aumento da redundância e confiabilidade do sistema devido ao maior número de informações fornecidas pelo conjunto de sensores.

A seguir são listados alguns exemplos de aplicação da teoria, técnica e ferramentas da fusão de dados com múltiplos sensores:

- Monitoração e supervisão de máquinas [60];
- Sistemas biométricos de identificação [66];
- Sistemas de monitoramento de aeronaves [60];
- Sistemas de processamento de imagens médicas [61], entre outros.

4.2.1 Estrutura dos sistemas de fusão de dados

Usualmente estes sistemas são representados por dois elementos:

1. Sensores: dispositivos inteligentes, cuja informação transmitida é chamada de *observação*;
2. Célula de fusão: parte principal do sistema, local onde as informações são efetivamente combinadas.

Além das informações transmitidas pelos sensores, a célula de fusão também pode receber outros tipos de informações, como por exemplo, resultados obtidos de algum processamento prévio das observações, ou ainda informações *a priori* que possam estar disponíveis sobre o processo observado [61].

Esses dois elementos que representam os sistemas de fusão de dados com múltiplos sensores podem ser combinados em distintas disposições. Os conjuntos constituídos por sensores e célula de fusão formam a *rede de fusão*.

A variação de arranjos permite a concepção de diferentes arquiteturas para as redes de fusão. Tais arquiteturas são abordadas na subseção seguinte.

4.2.2 Arquitetura dos sistemas de fusão de dados

Em geral, a divisão baseada nas diferentes arquiteturas das redes de fusão resultam em três grupos [60, 67]:

1. Arquitetura Centralizada: combina as observações não processadas (puras) dos sensores. Também são consideradas puras, informações que tenham sido filtradas em algum momento ou que foram obtidas a partir do tratamento preliminar de sinais externos. Uma representação desta arquitetura é apresentada pela Figura 4.1;

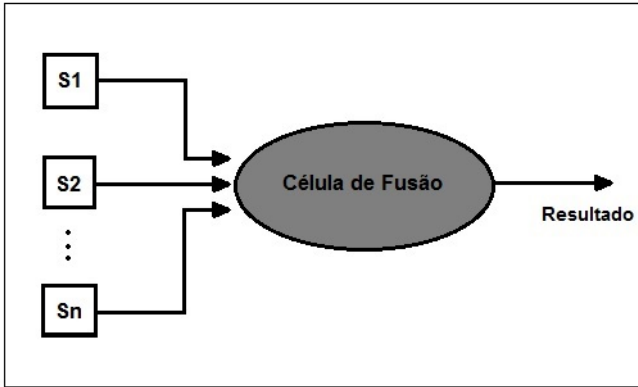


Figura 4.1 – Rede Centralizada.

2. Arquitetura Descentralizada: o processamento é realizado de forma distribuída, ocorrendo antes da fusão. Consequentemente, são recebidos na célula de fusão apenas os resultados após o processamento das observações;

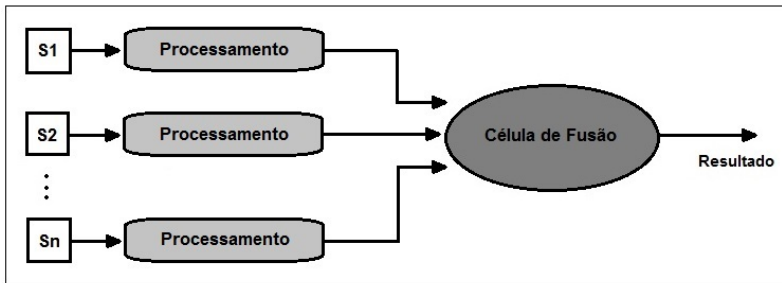


Figura 4.2 – Rede Descentralizada.

3. Arquitetura Híbrida: Composta pela combinação entre redes de arquitetura centralizada e descentralizada. Assim como os primeiros arranjos, este também é ilustrado na sequência.

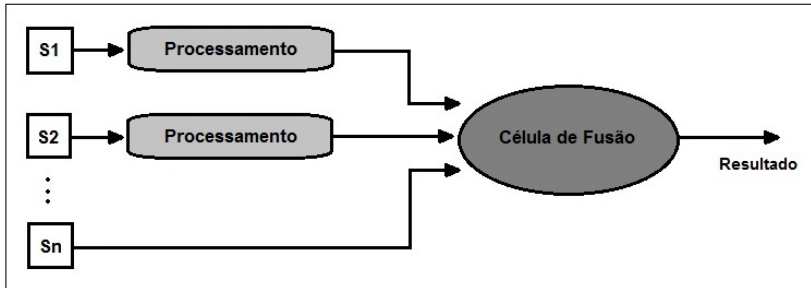


Figura 4.3 – Rede Híbrida.

Dentre os três grupos, a arquitetura centralizada é teoricamente a mais precisa para combinar informações. Porém ela esbarra em restrições para aplicações práticas, uma vez que é exigido um canal de comunicação com alta capacidade de transferência de dados para que todas as observações puras sejam enviadas à célula de fusão [61, 67].

O oposto ocorre com a arquitetura descentralizada, visto que as informações que chegam à célula de fusão já foram processadas previamente. Deste esquema resulta um processo de fusão mais simples e de baixo custo computacional, quando comparado à arquitetura centralizada [67]. Por essa razão, é este o arranjo adotado para executar a fusão de dados aplicada à EESP neste trabalho.

As referências [7, 68] destacam que há a possibilidade de serem obtidos os mesmos resultados para as arquiteturas centralizada e descentralizada, desde que sejam atendidas as seguintes condições de otimalidade para a fusão descentralizada:

- Os erros entre os distintos sensores devem ser não-correlacionados, e;
- As matrizes de observação de cada classe de medida devem apresentar posto-coluna completo.

Em termos da EESP, a primeira condição exige que os canais de comunicação utilizados pelos dois sistemas de medição (SCADA e fatorial) sejam distintos. Na segunda condição, as matrizes de observação correspondem às matrizes Jacobianas de cada plano de medição. Portanto, esta última condição requer que o sistema seja observável para cada uma das classes de medidas tratadas pela estimação de estados.

4.2.3 Formulação matemática

Neste tópico é apresentada a formulação matemática [5] utilizada para executar a fusão de dados de uma rede de fusão com arquitetura descentralizada.

Considere inicialmente um conjunto de estimativas:

$$\hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{N_S} \quad (4.1)$$

para um determinado vetor de estados (\mathbf{x}) de dimensão $n \times 1$, com a matriz de covariância cruzada dos erros de estimação dada por:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \dots & \mathbf{P}_{1N_S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{P}_{N_S 1} & \dots & \mathbf{P}_{N_S N_S} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Se $\tilde{\mathbf{x}}_i = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}_i$ é o vetor dos erros de estimação associado à i -ésima estimativa de $\hat{\mathbf{x}}$, a submatriz \mathbf{P}_{ij} é definida por:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{ij} &= cov\{\tilde{\mathbf{x}}_i, \tilde{\mathbf{x}}_j\} \\ &= E[(\hat{\mathbf{x}}_i - \hat{\mathbf{x}})(\hat{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{x}})^t], \quad i, j = 1, \dots, N_S. \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde a submatriz \mathbf{P}_{ij} tem dimensão $n \times n$.

A formulação da fusão de estimativa é realizada como uma combinação linear dessas estimativas. Se $\hat{\mathbf{x}}^*$ é o vetor ótimo de estados estimados, dessa combinação encontramos que:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{W}^t \hat{\mathbf{x}} \quad (4.4)$$

onde:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= [\hat{\mathbf{x}}_1^t, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{N_S}^t]^t; \\ \mathbf{W} &= [\mathbf{W}_1^t, \dots, \mathbf{W}_{N_S}^t]^t. \end{aligned}$$

As matrizes de ponderação \mathbf{W}_i , de dimensão $n \times n$, são obtidas de acordo com o seguinte problema de otimização com restrição matricial de igualdade:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{W}} \quad & E[(\mathbf{W}^t \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})(\mathbf{W}^t \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})^t] \\ \text{s.a} \quad & \mathbf{A}^t \mathbf{W} = \mathbf{I} \end{aligned} \quad (4.5)$$

onde:

$\mathbf{A} = [I \ I \ \dots \ I]^t$ possui dimensão $n \cdot N_S \times n$;
 \mathbf{I} é a matriz identidade ($n \times n$).

A restrição de igualdade do Problema (4.5) visa normalizar as matrizes de ponderação utilizadas em (4.4).

Para solucionar este problema de otimização, o critério utilizado é denominado de BLUE (da sigla em Inglês para *Best Linear Unbiased Estimation*), LMMSE (da sigla em Inglês para *Linear Minimum Mean Square Error*) ou LUMV (da sigla em Inglês para *Linear Unbiased Minimum Variance*) [69, 70].

Se \mathbf{P} for não-singular, o problema de otimização possui uma única solução em \mathbf{W} , sendo que as submatrizes \mathbf{W}_i são obtidas da equação [70]:

$$\mathbf{W}_i = \left(\sum_{k=1}^{N_S} \mathbf{P}_{ik}^{-1} \right) \left(\sum_{j,k=1}^{N_S} \mathbf{P}_{jk}^{-1} \right)^{-1} \quad (4.6)$$

Como a ideia é aplicar a técnica para combinar as estimativas de dois sistemas de medição, para o restante da formulação será considerado o caso onde estão presentes dois sensores, o que resulta em duas estimativas disponíveis, $\hat{\mathbf{x}}_1$ e $\hat{\mathbf{x}}_2$. Portanto, para $N_S = 2$ encontra-se:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{W}_1^t \hat{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{W}_2^t \hat{\mathbf{x}}_2 \quad (4.7)$$

As matrizes \mathbf{W}_1 e \mathbf{W}_2 são obtidas pela Equação (4.6). Dessa forma, a seguinte expressão é alcançada:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}^* = & (\mathbf{P}_{22} - \mathbf{P}_{21})(\mathbf{P}_{11} + \mathbf{P}_{22} - \mathbf{P}_{12} - \mathbf{P}_{21})^{-1} \hat{\mathbf{x}}_1 \\ & + (\mathbf{P}_{11} - \mathbf{P}_{12})(\mathbf{P}_{11} + \mathbf{P}_{22} - \mathbf{P}_{12} - \mathbf{P}_{21})^{-1} \hat{\mathbf{x}}_2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

conhecida como fórmula de *Bar-Shalom-Campo* para a fusão de dados no caso particular de dois sensores [71].

Supondo agora que as estimativas $\hat{\mathbf{x}}_1$ e $\hat{\mathbf{x}}_2$ são não-correlacionadas ($\mathbf{P}_{ij} = \mathbf{P}_{ji} = 0$), a fórmula reduzida da fusão de dados é dada por:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{P}_{22}(\mathbf{P}_{11} + \mathbf{P}_{22})^{-1} \hat{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{P}_{11}(\mathbf{P}_{11} + \mathbf{P}_{22})^{-1} \hat{\mathbf{x}}_2 \quad (4.9)$$

A partir dessa fórmula para fusão de dados de dois sensores, é detalhado no tópico seguinte a aplicação desta técnica em redes elétricas monitoradas pelos sistemas de medição (sensores) SCADA e fasorial.

4.2.4 Aplicação em sistemas elétricos de potência

Supõe-se que os dois sensores, utilizados para formulação matemática ilustrada anteriormente, sejam os sistemas SCADA e fasorial.

Os subíndices das variáveis são portanto designados correspondentemente por S e F. Logo, a Equação (4.9) pode ser reescrita como:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{P}_F(\mathbf{P}_S + \mathbf{P}_F)^{-1}\hat{\mathbf{x}}_S + \mathbf{P}_S(\mathbf{P}_S + \mathbf{P}_F)^{-1}\hat{\mathbf{x}}_F \quad (4.10)$$

onde \mathbf{P}_S e \mathbf{P}_F são as matrizes de covariância associadas aos estados $\hat{\mathbf{x}}_S$ e $\hat{\mathbf{x}}_F$, respectivamente.

Na formulação matemática do problema de estimação de estados apresentada no Capítulo 3, a matriz \mathbf{P} é definida pela Equação (3.23). Seguindo a mesma linha de raciocínio, conclui-se que \mathbf{P}_F , assim como \mathbf{P}_S , é dada pelo inverso de sua respectiva matriz ganho. Por conseguinte:

$$\mathbf{P}_S = \mathbf{G}_S^{-1} = (\mathbf{H}_S^t \mathbf{R}_S^{-1} \mathbf{H}_S)^{-1} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{P}_F = \mathbf{G}_F^{-1} = (\mathbf{H}_F^t \mathbf{R}_F^{-1} \mathbf{H}_F)^{-1}$$

Substituindo as matrizes de covariância associadas aos estados na Equação (4.10) pelas respectivas matrizes ganho, temos que:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{G}_F^{-1}(\mathbf{G}_S^{-1} + \mathbf{G}_F^{-1})^{-1}\hat{\mathbf{x}}_S + \mathbf{G}_S^{-1}(\mathbf{G}_S^{-1} + \mathbf{G}_F^{-1})^{-1}\hat{\mathbf{x}}_F \quad (4.12)$$

A obtenção direta de $\hat{\mathbf{x}}^*$ a partir da Equação (4.12), é computacionalmente ineficiente devido à necessidade do cálculo da inversa de diversas matrizes. Para contornar esta adversidade, recorre-se à identidade de Sherman-Morrison-Woodbury [72]. Segundo a qual:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{UCV})^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{VA}^{-1}\mathbf{U})^{-1}\mathbf{VA}^{-1} \quad (4.13)$$

onde \mathbf{A} , \mathbf{U} , \mathbf{C} e \mathbf{V} são matrizes de dimensões apropriadas. Considerando também que \mathbf{A} e \mathbf{C} são inversíveis e $\mathbf{U} = \mathbf{V} = \mathbf{I}$, a expressão reduz-se a:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{C})^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{A}^{-1})^{-1}\mathbf{A}^{-1} \quad (4.14)$$

O fator matricial comum do lado direito da Equação (4.12) pode ser representado de duas formas distintas através da Equação (4.14). Primeiramente, é suposto que $\mathbf{A} = \mathbf{G}_F^{-1}$ e $\mathbf{C} = \mathbf{G}_S^{-1}$:

$$(\mathbf{G}_S^{-1} + \mathbf{G}_F^{-1})^{-1} = \mathbf{G}_F(\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1}\mathbf{G}_F \quad (4.15)$$

Agora, de maneira similar, considera-se que $\mathbf{A} = \mathbf{G}_S^{-1}$ e $\mathbf{C} = \mathbf{G}_F^{-1}$:

$$(\mathbf{G}_S^{-1} + \mathbf{G}_F^{-1})^{-1} = \mathbf{G}_S(\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1}\mathbf{G}_S \quad (4.16)$$

Ao substituir as Expressões (4.15) e (4.16) no primeiro e segundo termos do lado direito da Equação (4.12), respectivamente, encontra-se:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}^* &= \mathbf{G}_F^{-1} [\mathbf{G}_F(\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} \mathbf{G}_F] \hat{\mathbf{x}}_S + \mathbf{G}_S^{-1} [\mathbf{G}_S(\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} \mathbf{G}_S] \hat{\mathbf{x}}_F \\ &= [\mathbf{I} - (\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} \mathbf{G}_F] \hat{\mathbf{x}}_S + [\mathbf{I} - (\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} \mathbf{G}_S] \hat{\mathbf{x}}_F\end{aligned}\quad (4.17)$$

Reconhecendo-se que as matrizes identidade da Equação (4.17) podem ser substituídas por:

$$\mathbf{I} = (\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} (\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F) \quad (4.18)$$

É possível reescrever a Equação (4.17) na seguinte forma:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = (\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} [(\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F) - \mathbf{G}_F] \hat{\mathbf{x}}_S + (\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} [(\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F) - \mathbf{G}_S] \hat{\mathbf{x}}_F$$

ou ainda:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = (\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} \mathbf{G}_S \hat{\mathbf{x}}_S + (\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F)^{-1} \mathbf{G}_F \hat{\mathbf{x}}_F \quad (4.19)$$

Finalmente, a partir da Equação (4.19) obtém-se a seguinte expressão:

$$(\mathbf{G}_S + \mathbf{G}_F) \hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{G}_S \hat{\mathbf{x}}_S + \mathbf{G}_F \hat{\mathbf{x}}_F \quad (4.20)$$

Deste modo, a solução do problema de fusão de estimativas individuais produzidas a partir de medidas dos sistemas SCADA e fasorial, reduz-se à solução de um sistema de equações lineares do tipo $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, a qual pode ser obtida a partir de métodos eficientes de fatoração LU e substituições direta e inversa, bem consolidados e de baixo custo computacional.

A partir da formulação matemática apresentada é possível integrar as medidas oriundas do sistema fasorial sincronizado à estimação de estados, sem que sejam ignoradas as informações provenientes do sistema SCADA, proporcionando desta maneira, um significativo aperfeiçoamento do processo de estimação de estados.

A Figura 4.4, adaptada de [5], resume o processo de fusão de dados para sistemas elétricos de potência monitorados por medidas convencionais e fasoriais.

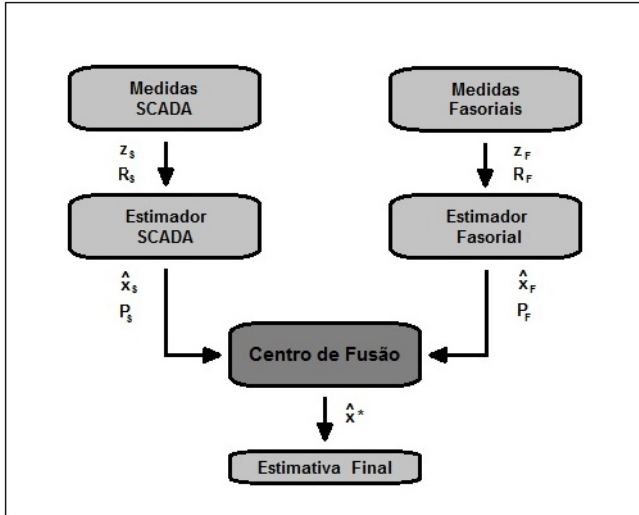


Figura 4.4 – Rede de fusão descentralizada baseada em medidas oriundas dos sistemas SCADA e fasorial.

4.3 Conclusões

A disponibilidade de medidas fasoriais nos sistemas elétricos de potência impulsionaram a pesquisa por métodos de integração dessas quantidades à estimação de estados. Estes estudos têm o propósito de aproveitar os principais benefícios oferecidos pelas medidas provenientes de PMUs, como por exemplo, a alta taxa de amostragem e o elevado nível de exatidão.

Para alcançar este objetivo, a estratégia adotada neste trabalho é a fusão de estimativas individuais obtidas a partir de medidas provenientes de múltiplos sensores. Por isso, neste capítulo são retratados os conceitos, técnicas e ferramentas da fusão de dados que possibilitam sua aplicação em sistemas elétricos de potência.

A partir das arquiteturas apresentadas para as redes de fusão, conclui-se que a utilização de uma rede de fusão com arquitetura descentralizada apresenta grandes vantagens quando aplicada em sistemas elétricos de potência. Dentre elas, destacam-se: a independência dos módulos de medição, o que favorece o uso dos estimadores convencionais

existentes nos centros de operação, e ainda a utilização de estimadores lineares, mais velozes e eficazes, para as medidas fasoriais. Outro fator importante é que o sistema não precisa ser integralmente observável com respeito ao SMFS.

Por fim, também é apresentada a formulação matemática utilizada para aplicação do método neste trabalho.

5 PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS

5.1 Introdução

No contexto da EESP, medidas contaminadas por erros grosseiros são aquelas com grau de imprecisão muito maior do que é suposto no modelo de medição. Alguns exemplos para a causa dessa contaminação das medidas são: erros em canais de comunicação, instrumentos de medição defeituosos, entre outros.

Quando processadas, essas medidas espúrias prejudicam o desempenho dos estimadores, deteriorando o estado estimado. Por esse motivo o processamento de erros grosseiros assume um papel muito importante para a confiabilidade da estimação de estados. Essa etapa tem a função de detectar, identificar e recuperar/eliminar todos os erros grosseiros presentes no plano de medição.

A fusão de estimativas, discutida no capítulo anterior, é vista como um método adequado para combinar as informações SCADA e fasoriais tirando proveito das vantagens de cada uma das referidas classes de medida.

Entretanto, medidas fasoriais, assim como as convencionais, são susceptíveis a erros de medição. Em que pesem os esforços dedicados à integração das medidas sincronizadas, o processamento de erros grosseiros associados às duas classes de medidas ainda representa um desafio para EESP, conforme mencionado na Seção 1.1.

Por este motivo, o foco principal desta dissertação é investigar os ganhos de eficiência no processamento de erros grosseiros associados à estimação de estados, proporcionados pelo cruzamento de informações convencionais obtidas do sistema SCADA e de medidas fasoriais sincronizadas.

Este trabalho aprofunda a metodologia proposta em [18, 19], a qual se restringe ao uso do clássico tratamento de erros grosseiros com base nos resíduos normalizados [20–22]. Nesta dissertação são também exploradas técnicas mais elaboradas, como o método- \hat{b} [1], e o HTI [23], além do uso do cruzamento de informações.

A exploração destas outras estratégias de identificação torna possível apontar a combinação de métodos mais efetiva para o tratamento de medidas espúrias. Evita-se desta maneira, que os dois vetores de estimativas enviados à célula de fusão estejam contaminados por erros grosseiros, o que promove um aperfeiçoamento significativo nos estados estimados pós fusão de dados.

Este capítulo conta com uma breve contextualização dos trabalhos envolvendo processamento de medidas fasoriais desenvolvidos no LABSPOT/UFSC. Após essa contextualização, primeiramente é apresentada a notação utilizada nesta etapa do trabalho com o propósito de facilitar o entendimento do conteúdo exibido no decorrer deste capítulo. Na sequência são detalhados os conceitos necessários para compreender a metodologia das técnicas de identificação de erros grosseiros previamente citadas.

5.2 Trabalhos Envolvendo o Processamento de Medidas Fasoriais Desenvolvidos no LABSPOT

A disponibilidade de medidas fasoriais sincronizadas além das convencionais, levantou novas perspectivas e estudos para a estimação de estados. Este tema já gerou diversas pesquisas no âmbito do LABSPOT/UFSC, as quais compreendem: análise da observabilidade e criticidade de medidas na EESP considerado medições fasoriais sincronizadas [53]; inserção das telemedidas oriundas de PMUs para o processamento conjunto com as medidas SCADA através de um estimador híbrido [73]; concepção de estratégias em dois estágios para incorporar medidas fasoriais à estimação de estados [5]; proposta de uma estratégia em dois estágios utilizando rotações de Givens em blocos visando também a integração de medidas oriundas dos sincrofases [6]; consideração de pseudomedidas através de métodos de fusão de estimativas para agregação de múltiplas fontes de informação à EESP [7].

Contribuições importantes foram apresentadas, principalmente, a partir dos trabalhos [5, 6], através dos artigos [10, 13].

Entretanto, nenhum destes trabalhos aborda o problema de processamento de erros grosseiros. Na referência [5] é simulado o efeito de erros grosseiros nas estratégias de fusão desenvolvidas para EESP, porém sem incluir o processamento destes erros, desde detecção, passando pela identificação e por fim sua eliminação ou, alternativamente, a recuperação das medidas errôneas.

Portanto, este trabalho tem o intuito de aprofundar as pesquisas [18, 19] neste quesito de processamento de erros grosseiros e desenvolver um algoritmo capaz de detectar/identificar e recuperar erros grosseiros múltiplos, quando incorporadas às diferentes classes de medidas na EESP.

5.3 Notação Utilizada no Desenvolvimento do Trabalho

Para o desenvolvimento dos métodos utilizados nesta dissertação, a seguinte notação é estabelecida.

Assim como no capítulo anterior, as quantidades relacionadas ao sistema SCADA são denominadas pelo subscrito S, enquanto que as medidas relacionadas ao sistema fasorial são indicadas pelo subscrito F. Usando \mathbf{A}_{XY} como um exemplo genérico da notação adotada, temos que \mathbf{A} indica uma variável (vetor ou matriz) calculada para a classe de medidas X a partir de estimativas disponíveis para a classe de medidas Y.

Se $X = Y$, diz-se que a quantidade é *própria*, enquanto que se $X \neq Y$ há o cruzamento de informação, e \mathbf{A}_{XY} é caracterizada como variável *cruzada*.

No desenvolvimento das metodologias de identificação de EGs para grandezas *próprias*, são apresentadas apenas as formulações para as medidas oriundas do sistema SCADA. O fato de que apenas a observabilidade com respeito às quantidades SCADA pode ser garantida restringe a aplicação de métodos convencionais à detecção/identificação de medidas espúrias no plano de medição fasorial.

Já para as grandezas *cruzadas*, são avaliados tanto o cruzamento SF como também o FS. Porém, para que o capítulo não se torne repetitivo na apresentação das equações, são exibidas apenas as variáveis referentes à estimativa para medidas SCADA, calculadas a partir dos estados estimados pelo sistema fasorial (cruzamento SF). No entanto, a situação oposta (cruzamento FS) pode ser obtida seguindo a mesma linha de pensamento.

Antes de avançar para as diferentes técnicas de identificação de EGs, são demonstradas na sequência as matrizes de covariância, *próprias* e *cruzadas*, necessárias no processo de identificação de medidas espúrias.

5.4 Matrizes de Covariância Próprias

Partindo do princípio que o vetor de estimativas próprias para as medidas do sistema SCADA é dado por [18]:

$$\hat{\mathbf{z}}_{SS} = \mathbf{h}_S(\hat{\mathbf{x}}_S) \quad (5.1)$$

tal que a sua matriz de covariância própria para estimativa das quantidades medidas pelo sistema SCADA pode ser obtida a partir da seguinte expressão [18]:

$$\mathbf{M}_{SS} = \mathbf{H}_{SS} \mathbf{P}_{SS} \mathbf{H}_{SS}^t \quad (5.2)$$

onde a matriz de covariância dos erros de estimação dos estados estimados pelo processamento de medidas SCADA, \mathbf{P}_{SS} , é calculada através de $\mathbf{P}_{SS} = \mathbf{G}_{SS}^{-1}$. A partir da matriz \mathbf{M}_{SS} , determina-se a matriz de covariância dos resíduos próprios [18]:

$$\mathbf{W}_{SS} = \mathbf{R}_{SS} - \mathbf{M}_{SS}, \quad (5.3)$$

sendo que os resíduos próprios referentes às medidas SCADA são definidos como $\mathbf{r}_{SS} = \mathbf{z}_S - \hat{\mathbf{z}}_{SS}$ (*valor medido – valor estimado*).

A matriz de covariância dos resíduos desempenha um importante papel nesta etapa de processamento de erros grosseiros, pois grande parte dos métodos utilizados nesse processo faz uso dos elementos dessa matriz para identificação e recuperação das medidas espúrias contidas no plano de medição.

5.5 Matrizes de Covariância Cruzadas

A mesma linha de raciocínio é trilhada a fim de obter a matriz de covariância dos resíduos cruzados. Inicialmente, considere que o vetor constituído pelas estimativas para as quantidades medidas no sistema SCADA, calculadas a partir dos estados estimados pelo módulo de estimação fasorial ($\hat{\mathbf{x}}_F$), é representado na seguinte expressão [18]:

$$\hat{\mathbf{z}}_{SF} = \mathbf{h}_S(\hat{\mathbf{x}}_F) \quad (5.4)$$

Então, a matriz de covariância cruzada para as estimativas das quantidades medidas pelo sistema SCADA obtidas a partir dos estados estimados $\hat{\mathbf{x}}_F$ é dada por [18]:

$$\mathbf{M}_{SF} = \mathbf{H}_{SF} \mathbf{P}_{FF} \mathbf{H}_{SF}^t \quad (5.5)$$

onde $\mathbf{H}_{SF} = \partial \mathbf{h}_S / \partial \mathbf{x}$ é a matriz Jacobiana das medidas convencionais calculadas considerando-se $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}_F$.

De posse dessa matriz, é finalmente obtida a matriz de covariância dos resíduos cruzados \mathbf{W}_{SF} [18]:

$$\mathbf{W}_{SF} = \mathbf{R}_{SS} + \mathbf{M}_{SF} \quad (5.6)$$

onde $\mathbf{r}_{SF} = \mathbf{z}_S - \hat{\mathbf{z}}_{SF}$ é o vetor dos resíduos cruzados da estimação. Ou seja, \mathbf{r}_{SF} contém os resíduos das estimativas SCADA, porém calculados a partir dos estados estimados pelo sistema fasorial.

Note que há uma inversão de sinal no cálculo da matriz de covariância dos resíduos quando se compara os cálculos de informações *próprias* e *cruzadas* (ver Equações (5.3) e (5.6)). Este fato ocorre devido à diferença existente entre estas abordagens. Enquanto as quantidades *próprias* possuem uma interdependência entre as variáveis de estado e as medições estimadas do sistema, as informações *cruzadas* pressupõem a independência estatística entre as classes de medidas adquiridas pelos sistemas de telemetria. Ou seja, aproveita-se o fato de que os erros de medição são não correlacionados entre as diferentes classes de medidores [18].

De posse desses conceitos a respeito das matrizes de covariância, principalmente \mathbf{W}_{SS} , \mathbf{W}_{SF} e \mathbf{W}_{FS} , são apresentados a seguir os critérios utilizados para identificação das medidas contaminadas por erros grosseiros.

5.6 Métodos de Identificação de EGs

A localização das medidas portadoras de erros grosseiros requer que seja realizado um exame individual dos resíduos da estimação. Nem sempre todas as medidas flagradas como suspeitas serão de fato errôneas, pois existe a possibilidade de que os resíduos de uma mesma classe de medidas sejam correlacionados entre si. O efeito do EG associado a uma medida pode assim se espalhar sobre os resíduos de outras quantidades [54, 55].

O objetivo de se utilizar a identificação de medidas espúrias baseada no cruzamento de resultados obtidos individualmente a partir de cada uma das referidas classes de medidas é justamente contornar os problemas advindo do espalhamento do erro. Isso é possível graças à independência estatística entre as classes de medidas.

Na sequência é exibida a metodologia para identificação de medidas portadoras de erros grosseiros para os seguintes métodos explorados nessa dissertação: teste dos resíduos normalizados próprios e cruzados; método- $\hat{\mathbf{b}}$ próprio e cruzado; identificação baseada em testes de hipóteses, ou HTI, este aplicado apenas para quantidades próprias.

5.6.1 Teste dos resíduos normalizados próprios

O teste dos resíduos normalizados, como o nome já indica, parte da normalização dos resíduos. Isso é realizado para que sejam consideradas as distintas variâncias dos diferentes tipos de medidores, uma vez que um resíduo discrepante para uma medida pode ser perfeitamente aceitável para outra. A normalização desses resíduos coloca-os em uma mesma base, permitindo assim uma comparação justa entre seus valores absolutos [54, 55].

Uma das dificuldades inerentes ao processo de identificação de erros grosseiros baseado na busca do máximo resíduo normalizado é o esforço computacional exigido no cálculo da variância dos resíduos. Ainda que a normalização requeira apenas os elementos diagonais de \mathbf{W} , continua sendo necessário o cálculo dos elementos da matriz ganho (operação de inversão matricial). Para minimizar essa perda computacional, são utilizadas técnicas de esparsidade de matrizes já discutidas no Capítulo 3.

Após o cálculo dos resíduos normalizados, é verificada a presença de erros grosseiros na medida através da seguinte validação estatística:

$$r_{SS}^N(i) = \frac{|r_{SS}(i)|}{\sqrt{W_{SS}(i,i)}} \leq \lambda \quad (5.7)$$

Caso o valor do resíduo normalizado seja superior a um dado limiar λ , a medida é designada como suspeita de estar contaminada por erro grosseiro. Porém, dentre todas as medidas suspeitas, a medida declarada como errônea é a que possuir o maior resíduo normalizado calculado na mesma iteração.

Para correção da medida considerada como portadora de erro grosseiro, é calculada a amplitude do EG em função das covariâncias do erro de medição ($\sigma_{SS}(i)$) e do resíduo de estimação [$W_{SS}(i,i)$] [1, 55]:

$$\hat{\beta}(i) = \frac{\sigma_{SS}^2(i)r_{SS}^N(i)}{\sqrt{W_{SS}(i,i)}} \quad (5.8)$$

Com isso, a medida recuperada pode ser calculada através da equação:

$$z_{SS}^{rec}(i) = z_{SS}(i) - \hat{\beta}(i) \quad (5.9)$$

Após a correção da medida de maior resíduo normalizado, os estados são reestimados e o teste é refeito até que nenhum dos resíduos calculados ultrapassem o limiar λ estabelecido.

5.6.2 Método- \hat{b} próprio

Este método baseia-se na consideração de que a variável $\hat{\beta}(i)$, representada pela Equação (5.8), pode ser interpretada como uma estimativa do erro associado à medida, ou seja, o quanto a medida é discrepante das demais. Comparando-se a magnitude desta discrepância com um limiar λ é possível concluir se o erro está dentro ou fora de uma faixa esperada (considerado aceitável).

Da Equação (5.8) pode-se obter a magnitude do erro, expressa em números de desvios-padrão, dada pela expressão [1]:

$$\hat{b}_{SS}(i) = \frac{|\hat{\beta}_{SS}(i)|}{\sigma_{SS}(i)} = \frac{\sigma_{SS}(i)|r_{SS}^N(i)|}{\sqrt{W_{SS}(i,i)}} \quad (5.10)$$

É importante ressaltar que apenas a medida com o maior resíduo normalizado da iteração é que terá sua estimativa do erro analisada, definindo-se então se a medida é ou não portadora de erro grosseiro. Portanto esse cálculo é realizado apenas uma vez a cada iteração necessária.

A recuperação da medida errônea torna-se uma tarefa fácil, uma vez que a estimativa da amplitude do erro já foi calculada no passo anterior. É suficiente apenas subtrair esse valor da quantidade medida [1].

Assim como o teste do máximo resíduo normalizado, após a recuperação da medida, os estados são reestimados e o processo é refeito até que o maior resíduo normalizado não tenha sua estimativa do erro superior ao limite λ estabelecido.

5.6.3 HTI

A identificação de medidas espúrias baseada em testes de hipóteses se inicia pela partição do conjunto de medidas em *válidas* (v) e *suspeitas de conterem erros grosseiros* (s). O critério para estabelecer esta partição é fundamentado nos valores absolutos dos resíduos normalizados: os que ultrapassarem um valor λ especificado são enquadrados como medidas suspeitas de conterem erros grosseiros [23, 24].

Consequentemente, o vetor dos erros de medição passa a ser escrito como:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_v \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

onde:

η_v corresponde às medidas válidas;
 η_s corresponde às medidas suspeitas.

Sabe-se que os resíduos se relacionam com os erros de medição da seguinte maneira:

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}\eta \quad (5.12)$$

Utilizando a partição do vetor η , temos:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_v \\ \mathbf{r}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{vv} & \mathbf{S}_{vs} \\ \mathbf{S}_{sv} & \mathbf{S}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_v \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Da equação matricial acima podemos escrever que:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_s &= \mathbf{S}_{ss}\eta_s + \mathbf{S}_{sv}\eta_v \\ \mathbf{r}_s &= \mathbf{S}_{ss}\eta_s + \mathbf{v} \end{aligned} \quad (5.14)$$

onde $\mathbf{v} = \mathbf{S}_{sv}\eta_v$.

Caso a triagem das medidas tenha sido bem conduzida e não existam grandezas espúrias dentro do conjunto de medidas consideradas válidas, o vetor \mathbf{v} é composto apenas de erros aleatórios de pequena magnitude. Considerando também que a matriz \mathbf{S}_{ss} é quadrada, a estimativa dos erros de medição é dada por:

$$\hat{\eta}_s = \mathbf{S}_{ss}^{-1}\mathbf{r}_s \quad (5.15)$$

A não singularidade de \mathbf{S}_{ss} é assegurada se o estado do sistema é observável com as $(m - s)$ medidas restantes [23]. A caracterização estatística das estimativas dos erros de medição supondo que a i -ésima medida suspeita é de fato errônea é a seguinte [23]:

$$\begin{aligned} E\{\hat{\eta}_{s_i}\} &= \eta_{s_i} \\ Var\{\hat{\eta}_{s_i}\} &= 0 + \sigma_i^2(\Gamma_{ii} - 1) \\ \hat{\eta}_{s_i} &\sim N(\eta_{s_i}, \sigma_i^2(\Gamma_{ii} - 1)) \end{aligned} \quad (5.16)$$

onde:

$$\Gamma_{ii} = \mathbf{S}_{ss}^{-1};$$

$N(\eta_{s_i}, \sigma_i^2(\Gamma_{ii} - 1))$ denota distribuição normal de probabilidade com média η_{s_i} e variância $\sigma_i^2(\Gamma_{ii} - 1)$;

η_{s_i} é a magnitude (em princípio desconhecida) do erro da medida i .

Se por outro lado a medida suspeita i é considerada válida, sua

caracterização estatística é dada por:

$$\hat{\eta}_{s_i} \sim N(0, \sigma_i^2 \Gamma_{ii}) \quad (5.17)$$

O método HTI pode ser aplicado mediante duas técnicas distintas: por teste de hipótese com probabilidade de falso alarme fixada, ou a partir da probabilidade de identificação fixada [23, 24]. Neste trabalho opta-se pela utilização do primeiro método de solução, que será detalhado na sequência.

A fim de identificar se a medida i está contaminada com um erro grosseiro, as seguintes hipóteses, básica e alternativa, são consideradas:

- H_0 : a medida i é válida;
- H_1 : a medida i é errônea.

Neste caso, parte-se do pressuposto que as medidas suspeitas são em princípio válidas e queremos determinar um limiar a partir do qual rejeitaremos a hipótese H_0 . Seja α o valor adotado para a probabilidade de falso alarme e $L_{\alpha,i}$ o limiar para a medida i . Tendo por base a estratégia de probabilidade de falso alarme fixada, podemos escrever que:

$$P[\hat{\eta}_{s_i} > L_{\alpha,i} | \text{medida } i \text{ é correta}] = \frac{\alpha}{2} \quad (5.18)$$

onde P denota probabilidade.

Como a cláusula condicional na expressão acima parte do pressuposto de que a medida suspeita é válida, a caracterização estatística a ser utilizada é dada pela Equação (5.17). É desejável expressar $\hat{\eta}_{s_i}$ na forma da distribuição normal padrão, o que nos habilita a utilizar os valores da tabela da distribuição $N(0,1)$. Portanto, a Equação (5.18) pode ser reescrita como:

$$P \left[\left| \frac{\hat{\eta}_{s_i}}{\sigma_i \sqrt{\Gamma_{ii}}} \right| > \lambda_\alpha \right] = \frac{\alpha}{2} \quad (5.19)$$

Definindo $N_{(1-\alpha/2)}$ como o percentil $100 \times (1 - \alpha/2)$ obtido da distribuição normal padrão, então:

$$\lambda_\alpha = N_{(1-\alpha/2)} \quad (5.20)$$

Disso resulta o seguinte limiar baseado em uma estratégia de probabilidade de falso alarme α fixada para decidir sobre a aceitação

da hipótese H_0 [23]:

$$L_{\alpha,i} = N_{(1-\alpha/2)} \sigma_i \sqrt{\Gamma_{ii}} \quad (5.21)$$

Essa equação conduz à seguinte regra de decisão:

- Rejeitar a medida i como errônea se $|\hat{\eta}_{s_i}| > L_{\alpha,i}$;
- Aceitá-la em caso contrário.

A recuperação das medidas identificadas como errôneas é realizada simultaneamente resultando em um processo rápido, uma vez que as estimativas dos erros de medição $|\hat{\eta}_s|$ já estão calculadas.

5.6.4 Teste dos resíduos normalizados cruzados

O teste dos resíduos normalizados cruzados segue o mesmo raciocínio já comentado para as informações próprias. A diferença é que a independência estatística entre as diferentes classes de medidas permite que seja realizada a identificação em bloco dos erros grosseiros, já que os resíduos são calculados a partir do cruzamento de informações. Isso evita que o erro seja espalhado no plano de medição, ou seja, impede que uma medida portadora de erro grosseiro contamine os resultados das demais medidas.

Por este motivo, a identificação em bloco dos EGs presentes é realizada em uma mesma iteração. Para isso, todas as quantidades em que os respectivos resíduos normalizados ultrapassarem o limiar estabelecido são consideradas como portadoras de erros grosseiros.

Esse cálculo é dado por:

$$r_{SF}^N(i) = \frac{|r_{SF}(i)|}{\sqrt{W_{SF}(i,i)}} \quad (5.22)$$

A recuperação das medidas espúrias de métodos que utilizam o cruzamento de informações é muito simples. As medidas sentenciadas como errôneas têm seus valores substituídos, simultaneamente, pela estimativa calculada para cada medida espúria a partir dos estados estimados pela outra classe.

5.6.5 Método- \hat{b} cruzado

O mesmo raciocínio utilizado para o teste de resíduos normalizados cruzados é aplicado também ao método- \hat{b} cruzado. A diferença principal entre as variantes própria e cruzada do método- \hat{b} , é que no primeiro caso a estimativa do erro é calculada apenas para o maior resíduo normalizado, enquanto que no segundo essa estimativa do erro é calculada para todas as medidas do plano de medição.

O cálculo realizado é apresentado pela expressão a seguir:

$$\begin{aligned}\hat{\beta}_{SF}(i) &= \frac{\sigma_{SS}^2(i)r_{SF}^N(i)}{\sqrt{W_{SF}(i,i)}} \\ \hat{b}_{SF}(i) &= \frac{|\hat{\beta}_{SF}(i)|}{\sigma_{SS}(i)} = \frac{\sigma_{SS}(i)|r_{SF}^N(i)|}{\sqrt{W_{SF}(i,i)}}\end{aligned}\tag{5.23}$$

Novamente, o fato de que os erros de medição são não correlacionados entre as classes de medidas permite a identificação de EGs em bloco, sendo necessária apenas uma iteração. A recuperação de medidas é realizada da mesma maneira como ocorre com o teste dos resíduos normalizados cruzados.

5.7 Diagnóstico para Presença de EGs

Diferentemente do método de detecção χ^2 [1], a investigação para presença ou não de erros grosseiros quando métodos convencionais e o cruzamento de informações são combinados é realizada a partir de uma análise estatística sobre violação dos limiares nos métodos utilizados para identificação de medidas espúrias [18]. A Tabela 5.1 sumariza como é feita a validação dos resultados para obtenção de um diagnóstico [18, 19]. A violação dos limiares SS e SF pode significar que a medida portadora de EG é convencional e está situada internamente à área observável por PMUs, ou ainda, que existem EGs nas duas classes de medidas simultaneamente. Por este motivo, a Tabela 5.1 apresenta dois possíveis diagnósticos para este caso em particular. Para contornar esta situação, faz-se necessário analisar o resultado obtido pelo cruzamento FS após o processamento das informações referentes ao sistema SCADA. Essa abordagem nos leva ao diagnóstico ilustrado pela Tabela 5.2. Ambas as tabelas são exibidas na página seguinte.

Tabela 5.1 – Tabela de Diagnóstico

Limitares Violados		Diagnóstico
SS	SF	
Sim	Sim	EGs em medidas SCADA e fasoriais simultaneamente ou EG em medida convencional situado dentro da ilha observável por PMUs
Sim	Não ¹	EG apenas em medidas convencionais situadas externamente à área não observável por PMUs
Não	Sim	EG em medidas fasoriais
Não	Não	Nenhum EG

Tabela 5.2 – Diagnóstico para o Caso Particular

Limitares Violados			Diagnóstico
SS	SF	FS	
Sim	Sim	Sim	EG em medidas convencionais e fasoriais simultaneamente
Sim	Sim	Não	EG apenas em medidas convencionais situadas internamente à área observável por PMUs

Após a etapa de identificação das medidas espúrias, é realizada a recuperação dessas quantidades com a intenção de obter, após o estágio de fusão, uma estimativa final ótima que represente fielmente os estados do sistema. Para facilitar a compreensão do processo de recuperação das medidas, este tema será novamente abordado no capítulo seguinte, acompanhado de resultados numéricos e sua respectiva análise.

¹Ainda que o sistema não seja integralmente observável com relação ao plano de medição fasorial, o cruzamento SF é capaz de identificar EGs em medidas convencionais localizadas dentro da ilha observável por PMUs. Portanto, para que a medida errônea esteja de fato fora desta área, o cruzamento SF deve estabelecer que nenhuma quantidade está contaminada.

5.8 Conclusão

A integração das medidas disponibilizadas pelo SMFS à estimação de estados é um tópico que tem despertado bastante interesse na literatura técnica. No entanto, menos atenção tem sido dedicada ao tratamento de erros grosseiros em conexão com as metodologias capazes de incluir essas novas medidas na EESP.

O processamento de EGs desempenha papel fundamental na estimação de estados e, por isso, é o foco principal deste trabalho. Neste capítulo são apresentadas as técnicas de identificação e recuperação de medidas espúrias, que são analisadas e avaliadas no capítulo seguinte. Além disso, também é discutido a forma de diagnosticar e tratar medidas contaminadas por erros grosseiros através da metodologia proposta que se baseia na combinação de técnicas convencionais e o cruzamento de informações.

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

6.1 Introdução

Com o objetivo de investigar os ganhos de eficiência no processamento de erros grosseiros associados à estimação de estados em sistemas de potência monitorados por medidas convencionais e fasoriais, são realizadas uma série de simulações que viabilizam a comparação de diferentes métodos, tais como cruzamento de informações, resíduos normalizados, método- \hat{b} e identificação baseada em testes de hipóteses (HTI). São apresentados neste capítulo os resultados obtidos nos estudos de caso acompanhados de suas respectivas análises. Além de investigar a performance dos métodos no processamento de erros grosseiros, também verificam-se os resultados finais da fusão alcançados via pós-processamento do estágio de detecção/identificação e recuperação de erros grosseiros.

Os casos de estudo aqui ilustrados buscam depurar as principais características de cada um dos métodos apresentados no decorrer do trabalho. Esses casos procuram reproduzir, de maneira fiel, eventos cotidianos dos sistemas elétricos de potência. Diversos cenários são verificados com o propósito de assegurar uma análise justa com respeito ao desempenho de cada método avaliado.

A seção seguinte deste capítulo detalha as condições de simulação deste trabalho. Comenta-se desde a metodologia e suposições adotadas, até os critérios utilizados na avaliação e validação dos resultados encontrados. As seções que constituem o restante do capítulo apresentam os resultados e análises para cada um dos casos simulados nos sistemas-teste IEEE de 14, 118 e 300 barras.

6.2 Considerações Sobre as Simulações

6.2.1 Metodologia e hipóteses adotadas

Para executar as simulações, inicialmente foram utilizados quatro algoritmos programados em linguagem FORTRAN, desenvolvidos em trabalhos de pesquisa anteriores no âmbito do LABSPOT/UFSC. O primeiro calcula o fluxo de potência do sistema utilizado. Outros dois verificam a observabilidade dos planos de medição para cada uma das

classes de medidas [53]. O último simula as medidas (contaminadas ou não) a partir dos resultados do fluxo de potência e também do plano de medição adotado. De posse destes valores, são utilizadas rotinas para estimação de estados, processamento de erros grosseiros e fusão de estimativas para encontrar os resultados avaliados neste capítulo. Os algoritmos encarregados da estimação de estados e fusão de estimativas foram adaptados de estudos anteriores para esta dissertação. Isso possibilita que tais rotinas trabalhem em sintonia com os algoritmos de processamento de erros grosseiros elaborados neste trabalho. Toda essa etapa foi realizada em linguagem e ambiente de programação MATLAB.

Na etapa da geração de valores para cada medida do plano de medição é atribuída uma certa exatidão para cada tipo de medida. A Tabela 6.1 expõe as precisões adotadas para todos os casos estudados nesta dissertação.

Tabela 6.1 – Precisão das medidas utilizadas na EESP

Símbolo	Classe	Quantidade Medida	Exatidão
$ V_i $	SCADA	Módulo de tensão na barra i	1%
P_i	SCADA	Injeção nodal de potência ativa na barra i	3%
Q_i	SCADA	Injeção nodal de potência reativa na barra i	3%
T_{ij}	SCADA	Fluxo de potência ativa no ramo i-j	3%
U_{ij}	SCADA	Fluxo de potência reativa no ramo i-j	3%
$ V_i $	Fasorial	Módulo de tensão na barra i	0,4%
$ \tilde{I}_{ij} $	Fasorial	Módulo de corrente no ramo i-j	0,4%
θ_i^V	Fasorial	Ângulo de fase da tensão na barra i	0,3%
θ_{ij}^I	Fasorial	Ângulo de fase da corrente no ramo i-j	0,3%

Com o intuito de reproduzir um ambiente de simulação que se aproxime da realidade, ruídos são adicionados nos valores das medidas a partir de números aleatórios com distribuição normal, média zero e variância associada à exatidão de cada medida. É importante realçar que no processo de estimação de estados, as medidas fasoriais de corrente são convertidas para coordenadas retangulares, resultando nas seguintes variáveis: parte real (I_{re}) e imaginária (I_{im}) da corrente fasorial nos ramos.

Para cada um dos casos apresentados no decorrer deste capítulo, são ilustrados os resultados de cem simulações. A cada simulação é variado de forma randômica o valor para cada medida do plano de medição, bem como as quantidades contaminadas por EG. Além disto, a cada nova simulação também varia-se a magnitude dos erros atribuídos às medidas. Essa variação ocorre de maneira aleatória respeitando um

intervalo estabelecido.

A falta de observabilidade da rede elétrica com relação às medidas fasoriais, representadas nos sistemas-teste IEEE de 118 e 300 barras, é contornada com a incorporação de informações *a priori* na estimação de estados. Utilizam-se informações *a priori* com um valor de $1,0 pu \angle 0 rad$ para as tensões complexas nas barras não observáveis da rede, o que assegura a criticidade dessas informações. Este conceito é importante, uma vez que os resíduos de dados críticos são nulos [74]. Desta forma, evita-se que os estados estimados para as barras observáveis pelas medidas adquiridas pelo SMFS sejam contaminadas pela incerteza das informações *a priori*.

Outro fator relevante na utilização deste artifício são os valores atribuídos para as variâncias das informações *a priori*. Para conciliá-los com o nível de exatidão dos demais sensores envolvidos na estimação de estados, estes valores devem refletir o maior grau de incerteza associado a estes dados, de forma que a ponderação atribuída às informações *a priori* sejam menores em relação ao conjunto de medidas adquiridas pelas fontes de dados para EESP. Assim sendo, as demais classes de medidas irão prevalecer sobre essas informações tanto na estimação de estados quanto no processo de fusão de estimativas, impedindo que os estados estimados finais estejam contaminados. Na prática, tem-se verificado que variâncias de aproximadamente dez ordens de grandeza acima dos valores atribuídos às outras medidas é suficiente para evitar a degradação dos resultados [5].

Todos os casos apresentados foram simulados em computador com processador *Intel Core i5*, 4ª geração, 1.7GHz e memória de 6GB.

6.2.2 Critério de avaliação dos resultados

Para melhor avaliar o desempenho dos métodos, são utilizados índices e métricas comentados na sequência.

No estágio detecção/identificação são avaliados, para cada método: o número de vezes em que é necessário estimar novamente os estados do sistema durante o processo de recuperação das medidas, e o esforço computacional de cada método, fundamentado no tempo total de processamento. Além disso, é avaliada a eficácia para detectar e identificar todas as medidas espúrias do plano de medição. O Índice de Eficácia (IEfic) é dado pela relação entre o número de casos onde todas as medidas contaminadas são corretamente identificadas/recuperadas, e o número total de casos simulados. Ainda neste estágio, o índice de

espalhamento do erro (IEsp) indica a porcentagem de medidas válidas rotuladas como suspeitas e o número total de medidas que constituem o plano de medição.

Como o índice de espalhamento de erro depende do número de medidas válidas rotuladas como suspeitas, é importante saber o critério adotado para definir se a medida é classificada como suspeita ou não. Para todos os casos estudados neste trabalho o critério para seleção de medidas suspeitas é o mesmo. Para os métodos convencionais este critério é dado por $|\mathbf{r}_{ss}^N| > 3$ e $|\mathbf{r}_{ss}^N| > 5$ para o teste dos resíduos normalizados e o método HTI, respectivamente. O método- $\hat{\mathbf{b}}$ apenas para medidas convencionais respeita o critério $\hat{\mathbf{b}}_{ss} > 4$, porém os resultados para esta estratégia não são ilustrados pelo índice IEsp, pois sua aplicação restringe-se à medida que apresenta o maior resíduo normalizado, independentemente portanto do refinamento de um conjunto pré-selecionado de medidas suspeitas.

Já os métodos que utilizam o cruzamento de informações, obedecem os seguintes critérios: $|\mathbf{r}_{sf}^N| > 3$ ou $|\mathbf{r}_{fs}^N| > 3$ para o teste dos resíduos normalizados e $\hat{\mathbf{b}}_{sf} > 4$ ou $\hat{\mathbf{b}}_{fs} > 4$ para o método $\hat{\mathbf{b}}$.

Para processar erros grosseiros via HTI, faz-se necessário definir outra variável do problema. Nesta dissertação, foi fixada uma probabilidade de falso alarme de 1% ($\alpha = 0,01$) para identificação das medidas errôneas dentro do grupo de quantidades suspeitas.

Para analisar a sensibilidade de detecção/identificação de cada método, todos os EGs inseridos nas medidas variam dentro de um intervalo pré-definido. A magnitude destes erros grosseiros simulados nos diversos cenários estudados variam entre 5σ e 30σ .

A estimativa final dos estados do sistema, obtida após o processamento de EG e a fusão das estimativas, é avaliada com base na média dos erros e desvio padrão dos módulos e ângulos das tensões nas barras do sistema. Além disso, a seguinte métrica de precisão da tensão complexa é utilizada [75]:

$$Mac_V = \|\dot{V}^{erro}\|_2 = \left(\sum_j |\dot{V}_j^{verd} - \dot{V}_j^{est}|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

onde \dot{V}_j^{verd} e \dot{V}_j^{est} são os fasores das tensões nodais da j -ésima barra “verdadeiras” (obtidas via fluxo de potência) e estimadas, respectivamente.

Os dados referentes aos sistemas-teste necessários para realizar as simulações foram retirados de [76]. Já os planos de medição utilizados

neste trabalho, quando não apresentados no decorrer deste capítulo, são detalhados nos anexos desta dissertação.

6.3 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 14-barras

Para este primeiro sistema, composto por 14 barras e 20 linhas de transmissão, são apresentados apenas dois casos com o intuito de introduzir os conceitos da metodologia proposta. O número de medidas que compõem o plano de medição adotado na simulação dos dois casos é detalhado na tabela a seguir:

Tabela 6.2 – Número de Medidas no Plano de Medição do Sistema-Teste IEEE 14-barras.

Medida	Plano de Medição	
	SCADA	Fasorial
$ V_i $	10	0
P_i	10	0
Q_i	10	0
T_{ij}	19	0
U_{ij}	19	0
$ \tilde{V}_i $	0	9
θ_i	0	9
$ \tilde{I}_{ij} $	0	20
θ_{ij}	0	20
Número total de Medidas	68	58
Redundância (ρ)	2,518	2,148

O sistema-teste IEEE 14-barras é amplamente utilizado, principalmente para testar, analisar e consolidar novas metodologias. É justamente essa a função exercida por este sistema neste capítulo de resultados. O algoritmo foi aplicado inicialmente a este sistema de pequeno porte, para testar as técnicas de detecção/identificação e recuperação de medidas errôneas avaliadas neste trabalho. Por este motivo, admite-se que este primeiro sistema-teste é observável com respeito às duas classes de medidas. Para melhor ilustrar este exemplo, o plano de medição apresentado pela Tabela 6.2 está detalhado nas figuras a seguir.

6.3.1 Caso 1: Presença de EGs apenas em medidas SCADA

O primeiro caso avalia o desempenho dos métodos na presença de erros grosseiros somente em medidas SCADA. Este caso é dividido em duas situações: (1.A) apenas uma medida SCADA é contaminada por erro grosseiro; (1.B) três medidas convencionais apresentam erros grosseiros.

São avaliados os índices de desempenho na detecção/identificação dos casos acima citados. Tais índices são exibidos nas tabelas a seguir, a primeira apresenta os resultados encontrados referente ao caso 1.A, enquanto que a outra indica os resultados para o caso 1.B.

Tabela 6.3 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1.A Sistema-teste 14 barras

Índice	Método				
	r^N	\hat{b}	HTI	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	1,49	-	0,87	0	0
IEfic (%)	98	99	99	100	100
Nº de Re-estimações ¹	0,99	0,99	0,99	1	1
Tempo Computacional (s)	0,07	0,05	0,06	0,02	0,02

Tabela 6.4 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1.B Sistema-teste 14 barras

Índice	Método				
	r^N	\hat{b}	HTI	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	3,6	-	1,21	0	0
IEfic (%)	95	98	98	100	100
Nº de Re-estimações	2,95	2,98	1	1	1
Tempo Computacional (s)	0,13	0,09	0,08	0,03	0,04

Para as duas primeiras situações verificadas, nota-se um bom índice de eficiência para todas as técnicas avaliadas. Porém é evidente a capacidade, tanto do método HTI quanto das estratégias que utilizam o cruzamento de informações, para identificar e recuperar as medidas

¹ Apesar do número de re-estimações ser inteiro para cada uma das simulações realizadas, o valor apresentado na tabela representa a média de todas as simulações para cada um dos casos analisados.

errôneas em bloco, sendo necessária apenas uma re-estimação o que acaba reduzindo o esforço computacional do processo.

Outro fato que se apresenta nestes resultados é a grande influência da independência estatística das duas classes de medidas no IEsp. São impactos significativos se considerados o tamanho do sistema-teste em questão e o número de medidas que compõem o plano de medição.

6.3.2 Caso 2: Presença de EGs apenas em medidas fasoriais

O segundo caso avalia o desempenho dos métodos na presença de erros grosseiros em medidas fasoriais. Assim como o primeiro caso, este também é dividido em duas situações: (2.A) apenas uma medida fasorial é contaminada por erro grosseiro; (2.B) duas medidas fasoriais apresentam erros grosseiros.

Como já discutido no capítulo anterior, para os casos onde apenas medidas fasoriais estiverem contaminadas por erros grosseiros, são utilizadas e analisadas somente as estratégias que utilizam o cruzamento de informações para processamento de EGs. Isto é viável pelo fato de que todos os sistemas-teste são observáveis com respeito às medidas convencionais.

Assim como para os primeiros casos, a seguir são apresentados os índices de desempenho referentes à detecção/identificação de EGs para os casos 2.A e 2.B.

Tabela 6.5 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2.A Sistema-teste 14 barras

Índice	Método	
	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	0	0
IEfic (%)	100	100
Nº de Re-estimações	1	1
Tempo Computacional (s)	0,02	0,02

As Tabelas 6.5 (acima) e 6.6 (página seguinte) apontam novamente a grande vantagem obtida ao tirar proveito da independência estatística entre as medidas provenientes dos dois sistemas de sensoriamento. A identificação e recuperação de medidas espúrias é veloz e eficaz.

Tabela 6.6 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2.B Sistema-teste 14 barras

Índice	Método	
	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	0	0
IEfic (%)	100	100
Nº de Re-estimacões	1	1
Tempo Computacional (s)	0,03	0,03

A subseção seguinte apresenta os resultados para o segundo sistema-teste, que nos permite avaliar um maior número de casos, além de aprofundar as análises realizadas.

6.4 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 118-barras

O segundo sistema-teste é composto por 118 barras e 179 linhas de transmissão. Além de ser um sistema de maior porte, são considerados os casos em que há falta de observabilidade do sistema com relação às medidas fasoriais. Dessa forma, é possível avaliar o desempenho da metodologia proposta em eventos que melhor representam a realidade dos sistemas elétricos de potência. Para este sistema serão considerados quatro casos distintos que são descritos adiante.

A falta de observabilidade com relação às medidas fasoriais permite que um maior número de situações sejam avaliadas. Além disto, as características deste sistema-teste também permitem investigar a qualidade das estimativas finais, obtidas após o processamento de erros grosseiros e fusão de estimativas, quando é utilizada a combinação de métodos convencionais e de cruzamento de informações.

A Tabela 6.7 apresenta a quantidade de medidas que compõem o plano de medição utilizado em todas as simulações referentes ao sistema-teste IEEE 118-barras. Seguindo o mesmo procedimento utilizado para o sistema-teste anterior, cem simulações distintas são realizadas para cada caso analisado, as quais diferem entre si pelos valores medidos, bem como pela escolha aleatória das medidas portadoras de erros grosseiros.

Tabela 6.7 – Número de Medidas no Plano de Medição do Sistema-Teste IEEE 118-barras.

Medida	Plano de Medição	
	SCADA	Fasorial
$ V_i $	67	0
P_i	72	0
Q_i	72	0
T_{ij}	116	0
U_{ij}	116	0
$ \tilde{V}_i $	0	35
θ_i	0	35
$ \tilde{I}_{ij} $	0	31
θ_{ij}	0	31
Número total de Medidas	443	132
Redundância (ρ)	1,885	0,562

O Anexo B apresenta de forma detalhada as medidas que compõem os planos de medição adotados para este sistema-teste.

6.4.1 Caso 1: Presença de EGs em medidas convencionais situadas dentro da área observável por PMUs

Novamente, este primeiro caso é dividido da seguinte maneira: (1.A) uma medida SCADA localizada dentro da área observável por PMUs é contaminada por EG; (1.B) cinco medidas SCADA apresentam EGs, todas elas localizadas internamente à área observável por grandezas fasoriais.

Desta vez, a primeira análise realizada é a respeito das medidas do plano de medição que são flagradas como suspeitas. A Tabela 6.8 apresenta o resultado de apenas uma simulação adotada como exemplo para cada um dos casos, com o intuito de ilustrar o espalhamento de erro.

Da mesma maneira, a Tabela 6.9 também aponta as medidas flagradas como suspeitas para os distintos métodos de identificação de medidas errôneas, porém agora para caso 1.B.

Tabela 6.8 – Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 1.A Sistema-teste 118 barras

		Caso 1.A
Medidas Contaminadas		P₁₀
Medidas suspeitas	r^N	$P_5, P_8, P_9, \mathbf{P_{10}}, Q_5, Q_8, Q_9, Q_{10}, T_{8-30}$
	HTI	$P_8, P_9, \mathbf{P_{10}}, Q_9, Q_{10}$
	r_{cruz}^N	P₁₀
	\hat{b}_{cruz}^N	P₁₀

Tabela 6.9 – Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 1.B Sistema-teste 118 barras

		Caso 1.B
Medidas Contaminadas		V₂, V₁₁₈, P₇₆, T₂₋₁₂, U₄₈₋₄₉
Medidas suspeitas	r^N	V₂, V₁₁₈, T₂₋₁₂, T₃₋₁₂, T₃₋₆₉, U₈₋₃₀, U₄₈₋₄₉, P₆₉, P₇₆, Q₄₆, Q₄₇, Q₄₈, Q₄₉, Q₇₆
	HTI	V₂, V₁₁₈, P₇₆, T₂₋₁₂, T₃₋₁₂, U₄₈₋₄₉, U₈₋₃₀
	r_{cruz}^N	V₂, V₁₁₈, P₇₆, T₂₋₁₂, U₄₈₋₄₉
	\hat{b}_{cruz}^N	V₂, V₁₁₈, P₇₆, T₂₋₁₂, U₄₈₋₄₉

Estes resultados demonstram o IEsp a partir de outro ponto de vista. Ao comparar os resultados, observa-se a grande vantagem em utilizar o cruzamento de informações. Esta técnica impede que ocorra o espalhamento do erro grosseiro ao longo do plano de medição, o que contribui para uma rápida identificação e recuperação de medidas espúrias.

Nota-se que o espalhamento do erro não é algo proporcional ao número de erros presentes no plano de medição. O número de medidas flagradas como suspeitas pode variar de acordo com a medida portadora de EG, a qual contaminará as quantidades que são correlacionadas a ela. Outros fatores também podem alterar o IEsp, como a magnitude do erro simulado.

É importante salientar que, para efeito de comparação, são apresentadas apenas as medidas flagradas como suspeitas na primeira iteração para o teste do resíduo normalizado *próprio*. Isto se deve ao fato de que esta é a única iteração em que existe a mesma quantidade de erros grosseiros para os distintos métodos.

Na sequência, são apresentados os índices de desempenho para detecção/identificação de medidas errôneas para o caso 1.A.

Tabela 6.10 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1.A Sistema-teste 118 barras

Índice	Método				
	r^N	\hat{b}	HTI	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	1,07	-	0,46	0	0
IEfic (%)	96	98	98	100	100
Nº de Re-estimações	0,98	0,98	0,98	1	1
Tempo Computacional (s)	0,28	0,24	0,26	0,23	0,24

Outra vez, todos os métodos apresentaram boa eficiência para identificação de uma única medida contaminada por EG. Foi encontrado aproximadamente o mesmo quadro apresentado no sistema-teste anterior, com a óbvia exceção dos tempos computacionais gastos, pelo fato de que há a necessidade de se processar um maior número de medidas. Ainda assim, as técnicas que utilizam o cruzamento de informações continuam apresentando os resultados mais atrativos.

A Tabela 6.11 exibe os índices encontrados para o caso 1.B, onde foram simulados EGs em cinco medidas situadas internamente à área observável pelo SMFS.

Tabela 6.11 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1.B Sistema-teste 118 barras

Índice	Método				
	r^N	\hat{b}	HTI	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	1,94	-	0,68	0	0
IEfic (%)	72	84	91	100	100
Nº de Re-estimações	4,56	4,80	1	1	1
Tempo Computacional (s)	0,61	0,38	0,32	0,27	0,30

Para um número maior de EGs no plano de medição, observa-se uma queda de eficiência de alguns métodos, principalmente daqueles que identificam e recuperam as medidas espúrias uma a uma.

Um fator interessante pode ser observado a respeito dos tempos computacionais gastos pelo método- \hat{b} e o HTI, quando comparadas as Tabelas 6.10 e 6.11. Na presença de apenas 1 medida espúria no plano de medição, temos que o método- \hat{b} é capaz de identificar e recuperar esta medida em um tempo inferior ao apresentado pela técnica HTI. O contrário acontece na presença de cinco medidas errôneas no plano de medição. Isso ocorre pela necessidade do método HTI calcular a esti-

mativa do erro para um grupo de medidas enquadradas como suspeitas. Por isso, na presença de apenas uma medida espúria o método- \hat{b} acaba sendo mais veloz, enquanto que na presença de erros grosseiros múltiplos, a possibilidade de identificar e recuperar as medidas errôneas em bloco conta a favor do método HTI.

6.4.2 Caso 2: Presença de EGs em medidas convencionais localizadas interna e externamente à área observável por PMUs

No segundo caso são analisadas as situações em que as medidas convencionais contaminadas por EGs estão situadas interna e externamente à área observável por PMUs. Considera-se os eventos onde: (2.A) apenas uma medida convencional é contaminada por erro grosseiro, porém ela está localizada fora da ilha observável por PMUs; (2.B) quatro medidas SCADA estão contaminadas por erros grosseiros, sendo que apenas uma dessas medidas está situada fora da área observável por grandezas fasoriais. A seguir, as tabelas apresentam um exemplo das medidas flagradas como suspeitas para este caso:

Tabela 6.12 – Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 2.A Sistema-teste 118 barras

	Caso 2.A
Medidas Contaminadas	Q₉₅
r^N	U_{94-95} , Q₉₅
Medidas suspeitas HTI	U_{94-95} , Q₉₅
r_{cruz}^N	-
\hat{b}_{cruz}^N	-

Tabela 6.13 – Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 2.B Sistema-teste 118 barras

	Caso 2.B
Medidas Contaminadas	V₉₉, P₄₈, Q₂₅, Q₉₅
r^N	V₉₉, P₄₈, Q₂₅, Q₉₅, T₄₈₋₄₉, U₁₄₋₁₅, U₂₃₋₂₅, U₂₅₋₂₆, U₂₆₋₃₀
Medidas suspeitas HTI	V₉₉, P₄₈, Q₂₅, Q₉₅, U₂₅₋₂₆
r_{cruz}^N	V₉₉, P₄₈, Q₂₅
\hat{b}_{cruz}^N	V₉₉, P₄₈, Q₂₅

As Tabelas 6.12 e 6.13 apontam a maior fragilidade da estratégia do cruzamento de informações. A falta de observabilidade do SMFS não permite a identificação de quantidades convencionais espúrias quando estas encontram-se fora da área observável por medidas fasoriais. Note que a medida Q_{95} é a única que está situada na área não observável por PMUs, consequentemente ela não é identificada pelos métodos que cruzam informações.

Porém os métodos convencionais são capazes de identificá-la normalmente. É justamente essa situação que estimula a combinação de métodos convencionais e os que utilizam o cruzamento de informações com o propósito de possibilitar a detecção e identificação de erros grosseiros em sistemas de potência monitorados por medidas SCADA e fasoriais.

A seguir, são apresentados os índices obtidos para os casos 2.A e 2.B:

Tabela 6.14 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2.A Sistema-teste 118 barras

Índice	Método				
	r^N	\hat{b}	HTI	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	0,91	-	0,39	0	0
IEfic (%)	95	97	98	-	-
Nº de Re-estimações	0,98	0,98	0,98	0	0
Tempo Computacional (s)	0,29	0,24	0,25	0,12	0,15

Tabela 6.15 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2.B Sistema-teste 118 barras

Índice	Método				
	r^N	\hat{b}	HTI	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	1,72	-	0,55	0	0
IEfic (%)	76	88	93	-	-
Nº de Re-estimações	3,67	3,85	1	1	1
Tempo Computacional (s)	0,54	0,30	0,29	0,26	0,29

Os resultados ilustrados evidenciam o que foi discutido anteriormente. Também vale ressaltar o melhor desempenho obtido pelo HTI e o método- \hat{b} quando comparado com o teste dos resíduos normalizados *próprios*. Uma vez que a metodologia para processamento de EG ado-

tada combina métodos convencionais com a técnica do cruzamento de informações, é importante avaliar qual método convencional apresenta melhor desempenho na identificação de medidas espúrias.

6.4.3 Caso 3: Presença de EGs em medidas fasoriais

Neste caso são avaliados os desempenhos somente das técnicas que utilizam o cruzamento de informações. Com isso, evita-se o uso de métodos convencionais para detecção de erros grosseiros em planos de medição não observáveis. O fato do sistema ser observável com respeito às medidas convencionais favorece o uso de informações *cruzadas*, uma vez que qualquer medida fasorial estará situada internamente à ilha observável pelo sistema SCADA. Porém, considera-se que, neste caso, uma identificação correta não deve apontar EGs em medidas convencionais. As duas situações a serem avaliadas são as seguintes: (3.A) apenas uma medida fasorial é contaminada por EG; (3.B) quatro medidas fasoriais são contaminadas por EGs.

Na sequência são exibidas as tabelas referentes ao caso 3.A:

Tabela 6.16 – Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 3.A Sistema-teste 118 barras

		Caso 3.A
Medidas Contaminadas		$ \tilde{\mathbf{V}}_4 $
Medidas suspeitas	r_{cruz}^N	$ \tilde{\mathbf{V}}_4 $
	\hat{b}_{cruz}^N	$ \tilde{\mathbf{V}}_4 $

Tabela 6.17 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 3.A Sistema-teste 118 barras

Índice	Método	
	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	0	0
IEfic (%)	100	100
Nº de Re-estimações	1	1
Tempo Computacional (s)	0,20	0,24

Outra vez o cruzamento de informações mostra sua capacidade de impedir que medidas válidas sejam contaminadas por EGs simula-

dos em outras quantidades. Ou seja, evitam o espalhamento do erro durante o processo de identificação de medidas fasoriais espúrias. O mesmo pode ser observado nos resultados obtidos para o caso 3.B ilustrados abaixo:

Tabela 6.18 – Medidas Portadoras de EG e Medidas Flagradas como Suspeitas - Caso 3.B Sistema-teste 118 barras

		Caso 3.B			
Medidas Contaminadas		$ \tilde{\mathbf{V}}_{113} $	$\theta_{118}^{\mathbf{V}}$	$ \tilde{\mathbf{I}}_{4-5} $	$\theta_{4-5}^{\mathbf{I}}$
Medidas suspeitas	r_{cruz}^N	$ \mathbf{V}_{113} $	$\theta_{118}^{\mathbf{V}}$	\mathbf{I}_{4-5}^{re}	\mathbf{I}_{4-5}^{im}
	\hat{b}_{cruz}^N	$ \tilde{\mathbf{V}}_{113} $	$\theta_{118}^{\mathbf{V}}$	\mathbf{I}_{4-5}^{re}	\mathbf{I}_{4-5}^{im}

Tabela 6.19 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 3.B Sistema-teste 118 barras

Índice	Método	
	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	0	0
IEfic (%)	100	100
Nº de Re-estimações	1	1
Tempo Computacional (s)	0,24	0,28

Novamente os índices apontam os grandes benefícios do cruzamento de informações. Como já comentado, esta eficiência só é obtida quando apenas uma das classes de medidas está contaminada por EG.

Assim como a falta de observabilidade, a ocorrência simultânea de EGs em medidas SCADA e fasoriais pode ser contornada a partir da combinação destas técnicas com um método convencional.

Com base nos resultados até aqui apresentados, nota-se que dentre os métodos convencionais avaliados, o que demonstra os melhores índices é o HTL. Portanto, é este o método adotado para auxiliar as técnicas que fazem o uso do cruzamento de informações.

A subseção seguinte descreve como é realizada a recuperação das medidas após o diagnóstico final da presença de erros grosseiros. Além disso, também é avaliada a qualidade dos estados estimados finais obtidos pós estágio de fusão de estimativas.

6.4.4 Recuperação das medidas e avaliação da estimativa final

Para tirar proveito dos benefícios propiciados pela integração das medidas fasoriais à EESP, deve-se também utilizar um método capaz de processar erros grosseiros nas duas classes de medidas. Neste aspecto, a metodologia de diagnóstico para detecção e identificação de EG proposta em [18, 19] mostra-se bastante interessante, já que explora o valioso recurso propiciado pelo cruzamento de informações. Além disto, a combinação destas técnicas com métodos convencionais possibilita contornar o problema da falta de observabilidade das redes elétricas com relação às medidas fasoriais.

Após as avaliações de desempenho exibidas, a combinação adotada neste trabalho é o teste do resíduo normalizado *cruzado* auxiliado pelo método HTI.

Para alcançar o vetor de estados estimados ótimo obtido através da fusão de estimativas, primeiramente deve ser finalizada a etapa de processamento do EG. Para isso, são verificadas as tabelas de diagnósticos para detecção/identificação de medidas espúrias apresentadas no Capítulo 5. Após a identificação destes erros, a recuperação das medidas respeita a seguinte tabela:

Tabela 6.20 – Metodologia para recuperação dos EGs identificados

Localização do EG	Método para Recuperação	
	SCADA	PMU
Medidas SCADA dentro da área observável por PMUs	r_{cruzSF}^N	-
Medidas convencionais e fasoriais	HTI_{SS}	r_{cruzFS}^N
Medidas SCADA fora da área observável por PMUs	HTI_{SS}	-
Medidas fasoriais	-	r_{cruzFS}^N

Portanto, foram realizadas duas análises para cada um dos casos estudados. Inicialmente foram analisados os desempenhos dos diversos métodos para identificação de EGs a fim de obter a melhor combinação entre estes métodos. Também foram utilizados estes mesmos erros para avaliar a recuperação das medidas espúrias a partir da combinação do método HTI com o teste dos resíduos normalizados *cruzados* com o intuito de investigar os ganhos de eficiência tanto no processamento de EGs como também a qualidade da estimativa final.

Depois de recuperar as medidas, os dois vetores de estimativas obtidos são enviados para a célula de fusão com o objetivo de produzir um vetor ótimo composto pelos estados estimados do sistema.

Como forma de validação desta última etapa, a tabela abaixo

apresenta os indicadores de desempenho das estimativas finais encontradas. O caso 4 adicionado nesta tabela representa as situações onde foram simulados erros grosseiros em grandezas pertencentes às duas classes de medidas simultaneamente.

Tabela 6.21 – Média dos Indicadores de Desempenho da Estimativa Final - Sistema-teste 118 barras

Caso	Métrica de Tensão	Média do Erro		Desvio-Padrão	
		$ V $	δ	$ V $	δ
1.A	$6,72e^{-2}$	$6e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7,77e^{-4}$	$4,17e^{-4}$
1.B	$6,5e^{-2}$	$6e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7,76e^{-4}$	$4,22e^{-4}$
2.A	$6,65e^{-2}$	$6e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7,74e^{-4}$	$4,22e^{-4}$
2.B	$6,75e^{-2}$	$6e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7,84e^{-4}$	$4,28e^{-4}$
3.A	$6,39e^{-2}$	$5e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7,65e^{-4}$	$4,22e^{-4}$
3.B	$7,15e^{-2}$	$6e^{-4}$	$5e^{-4}$	$7,87e^{-4}$	$4,11e^{-4}$
4	$7,36e^{-2}$	$6e^{-4}$	$5e^{-4}$	$8e^{-4}$	$4,42e^{-4}$

Os índices de desempenho da estimativa final apresentados são um indicativo de que a técnica de cruzamento de informações combinada com o método HTI para o processamento de erros grosseiros são capazes de identificar e recuperar EGs presentes nos planos de medição em diversas situações. Esta metodologia possibilita aproveitar os benefícios da inclusão das medidas fasoriais no sistema elétrico de potência. A Tabela 6.21 indica uma baixa média de erros e desvios-padrão para módulo e ângulo das tensões estimadas após o processamento dos EGs. Outro dado relevante é que a estimativa final apresenta boa aderência quando comparada ao resultado do fluxo de potência, repetindo os excelentes resultados apresentados pela fusão de estimativas em [5, 13].

6.5 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 300-barras

Por fim, são apresentados os resultados encontrados para o último sistema-teste. Este sistema é composto por 300 barras e 411 circuitos. A utilização deste sistema-teste permite avaliar a aplicabilidade e desempenho da metodologia proposta em sistemas de maior porte, ainda sendo considerada a falta de observabilidade do sistema quando consideradas apenas as medidas fasoriais.

O plano de medição é composto pela quantidade de medida apresentadas na Tabela 6.22. Todos os casos julgados para este sistema são baseados neste plano de medição. Como nos sistemas-teste anteriores,

para cada caso considerado são realizadas 100 simulações, que diferem entre si pelos valores das medidas e pela constituição do conjunto de medidas portadoras de erros grosseiros.

Tabela 6.22 – Número de Medidas no Plano de Medição do Sistema-Teste IEEE 300-barras.

Medida	Plano de Medição	
	SCADA	Fasorial
$ V_i $	220	0
P_i	230	0
Q_i	230	0
T_{ij}	285	0
U_{ij}	285	0
$ \tilde{V}_i $	0	70
θ_i	0	70
$ \tilde{I}_{ij} $	0	155
θ_{ij}	0	155
Número total de Medidas	1250	450
Redundância (ρ)	2,087	0,751

O Anexo C apresenta de forma detalhada as medidas que compõem os planos de medição adotados para este sistema-teste.

6.5.1 Caso 1: Presença de EGs em medidas convencionais situadas internamente à área observável por PMUs

Ao contrário das situações analisadas para os dois primeiros sistemas-teste, neste caso não é considerada a presença de EG simples no plano de medição convencional. São avaliados os índices de desempenho somente na presença de EGs múltiplos em medidas convencionais localizadas dentro da área observável por PMUs. Mais precisamente, este caso investiga os índices de desempenho na detecção/identificação de quantidades espúrias, na presença de sete medidas contaminadas por EGs. Todas estas grandezas errôneas estão situadas internamente à área observável por medidas fasoriais.

Os resultados, que são apresentados na tabela a seguir, novamente indicam a grande eficiência do cruzamento de informações, obtida através do aproveitamento da independência estatística entre as classes de medidas. Dentre os métodos clássicos o HTI é quem apre-

senta os melhores índices.

Tabela 6.23 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 1 Sistema-teste 300 barras

Índice	Método				
	r^N	\hat{b}	HTI	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	1,24	-	0,63	0	0
IEfic (%)	64	81	90	100	100
Nº de Re-estimações	6,45	6,73	1	1	1
Tempo Computacional (s)	1,36	0,91	0,73	0,64	0,69

É importante salientar que os valores de IEsp são normalizados pela quantidade de medidas presentes no plano de medição. Neste caso, o plano de medição convencional é composto por 1250 medidas. Portanto, os baixos valores expressos ilustrados pela tabela equivalem na verdade a um número significativo de medidas válidas flagradas como suspeitas.

Outro fato que se repete é a capacidade de identificação e recuperação em bloco de EGs apresentada por algumas estratégias. Tanto as técnicas que cruzam informações das duas classes de medidas, como também o método convencional HTI possuem essa característica.

A maior média de re-estimações exigidas pelo método- \hat{b} , quando comparado com o teste dos resíduos normalizados *próprios*, está diretamente ligada à sua maior eficiência e sensibilidade na identificação de EGs, o que acarreta um maior número de medidas recuperadas por este método. Na sequência são ilustrados os resultados encontrados para outro estudo de caso.

6.5.2 Caso 2: Presença de EGs em medidas SCADA localizadas dentro e fora da ilha observável por medidas fasoriais

Investiga-se mais uma vez apenas o desempenho dos métodos na presença de EGs múltiplos. Considera-se somente a situação onde 6 medidas convencionais são contaminadas por erros grosseiros, sendo que duas delas estão situadas fora da área observável por PMUs. A tabela abaixo apresenta os índices de desempenho para cada um dos métodos avaliados nesta situação.

Tabela 6.24 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 2 Sistema-teste 300 barras

Índice	Método				
	r^N	\hat{b}	HTI	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	1,11	-	0,57	0	0
IEfic (%)	68	83	91	-	-
Nº de Re-estimações	5,54	5,81	1	1	1
Tempo Computacional (s)	1,19	0,86	0,71	0,63	0,67

Os resultados consistentemente indicam que o método HTI apresenta o melhor desempenho dentre os métodos convencionais. Por este motivo foi o método adotado para ser combinado à estratégia do cruzamento de informações. Contornam-se desta forma possíveis problemas de falta de observabilidade apresentados pela integração das medidas fasoriais à EESP.

6.5.3 Caso 3: Presença de EGs em medidas fasoriais

O caso 3 avalia a performance do teste dos resíduos normalizados *cruzados* e também do método- \hat{b} *cruzado*, quando simuladas seis medidas errôneas no plano de medição fasorial. A seguir são exibidos os índices de desempenho destes dois métodos.

Tabela 6.25 – Média dos Índices de Desempenho na Detecção e Identificação de EGs - Caso 3 Sistema-teste 300 barras

Índice	Método	
	r_{cruz}^N	\hat{b}_{cruz}^N
IEsp (%)	0	0
IEfic (%)	100	100
Nº de Re-estimações	1	1
Tempo Computacional (s)	0,51	0,54

Os resultados apresentados para os três casos deste sistema teste são representativos dos casos estudados com auxílio dos outros dois sistemas-teste.

Em geral os resultados consistentemente indicam que a melhor combinação para detecção/identificação e recuperação de medidas espúrias envolve o método HTI e algum dos dois métodos que utilizam

o cruzamento de informações (já que, também consistentemente, estes últimos apresentam resultados bem similares).

Para validação das estimativas finais é utilizada a mesma metodologia adotada para o sistema-teste IEEE 118-barras. Ou seja, são analisados os resultados obtidos pela combinação dos métodos HTI e resíduo normalizado *cruzado*.

Portanto, o diagnóstico de detecção/identificação de medidas espúrias e também a recuperação destas quantidades segue o mesmo raciocínio apresentado nos resultados referentes ao sistema-teste anterior.

Desta maneira é possível realizar o processamento de EG para cada módulo de estimação e obter estimativas confiáveis, antes de enviá-las à célula de fusão que determina a estimativa final.

6.5.4 Avaliação da estimativa final

Como forma de validação desta última etapa, a Tabela 6.26 apresenta as métricas de tensão após a fusão de estimativas convencionais e fasoriais.

Tabela 6.26 – Média dos Indicadores de Desempenho da Estimativa Final - Sistema-teste 300 barras

Caso	Métrica de Tensão	Média do Erro		Desvio-Padrão	
		$ V $	δ	$ V $	δ
1	$7,76e^{-2}$	$9e^{-4}$	$6e^{-4}$	$9,12e^{-4}$	$5,97e^{-4}$
2	$7,94e^{-2}$	$1,1e^{-3}$	$7e^{-4}$	$9,31e^{-4}$	$6,18e^{-4}$
3	$7,79e^{-2}$	$1e^{-3}$	$6e^{-4}$	$9,19e^{-4}$	$6,05e^{-4}$
4	$8,22e^{-2}$	$1,1e^{-3}$	$7e^{-4}$	$9,56e^{-4}$	$6,30e^{-4}$

O caso 4, acrescentado nesta tabela, exhibe os índices obtidos nos casos em que quantidades das duas classes de medidas estão simultaneamente contaminadas por erros grosseiros. Essa situação não foi utilizada na avaliação individual dos métodos de identificação de EGs, justamente por ser necessária uma combinação de métodos para viabilizar o processamento das medidas espúrias deste caso.

Os índices de desempenho da estimativa final ilustrados na Tabela 6.26 indicam novamente, que a combinação envolvendo o método HTI e o teste dos resíduos normalizados *cruzados* utilizada para processar medidas errôneas é capaz de identificar e recuperar EGs em diversos cenários.

Desta maneira, torna-se possível aperfeiçoar os estados estimados a partir da integração de medidas fasoriais à EESP via fusão de estimativas, uma vez que a metodologia proposta se mostra capaz de processar possíveis EGs nos planos de medição evitando que a estimativa final seja deteriorada por estas medidas espúrias.

6.6 Conclusões

Este capítulo exhibe os resultados de simulações, aplicados a três sistemas-teste. São avaliados os desempenhos dos métodos de processamento de erros grosseiros descritos no Capítulo 5, e também a qualidade do resultado final obtido via fusão de estimativas.

De acordo com os resultados apresentados, é evidente que a técnica de cruzamento de informações é capaz de processar erros grosseiros em sistemas de potência monitorados por medidas convencionais e fasoriais com grande eficiência. A independência estatística entre as duas classes de medidas explorada pelo método, justifica o fato desta estratégia se mostrar bastante sensível à presença de medidas espúrias independentemente da amplitude desses erros. Consequentemente, o método impede que medidas válidas sejam flagradas no estágio de detecção/identificação como suspeitas.

Também é possível concluir com base nos resultados que a fragilidade do cruzamento de informações para identificar erros em medidas convencionais situadas fora da zona observável por PMUs, pode ser contornada através da combinação dessa técnica com métodos convencionais.

Dentre os métodos convencionais avaliados por este trabalho, o HTI é o detentor do melhor desempenho, sendo, por este motivo, o método adequado para auxiliar as técnicas que fazem uso do cruzamento de informações.

Os resultados comprovam que a estratégia de combinar o cruzamento de informações com o método HTI para detecção/identificação de medidas espúrias é capaz de identificar EGs para diferentes casos, incluindo aqueles em que tais erros ocorrem simultaneamente nas duas classes de medidas. Este desempenho possibilita o aproveitamento dos benefícios da inclusão de medidas fasoriais nos sistemas elétricos de potência, a qual proporciona um significativo aperfeiçoamento do processo de estimação de estados, tornando-o ainda mais eficaz e confiável. Outra vantagem desta estratégia se refere a uma característica em comum destes métodos: a possibilidade de realizar a identificação e recupera-

ção em bloco das medidas espúrias, o que implica em uma redução do esforço computacional (menor tempo de processamento dos módulos de estimação).

É importante ressaltar que não foram adotados procedimentos específicos para definição dos planos de medição, assim como não foram utilizados métodos para alocação ótima de PMUs. Possivelmente a adoção destes procedimentos pode proporcionar resultados ainda melhores em relação aos apresentados neste capítulo. Também é abordado neste trabalho um método para compatibilização das medidas fasoriais para serem tratadas conjuntamente com as informações do sistema SCADA, uma vez que os sistemas possuem taxa de amostragem bem diferentes, como fora discutido no Capítulo 2. Além disso, há a necessidade de compatibilizar a referência angular entre os sistemas SCADA e SMFS, tema este, que também não é abordado no decorrer do trabalho. É suposto, então, que os dados fasoriais simulados já tenham recebido este tratamento e estão aptos para inclusão na EESP.

7 CONCLUSÕES

7.1 Considerações Finais

A gradual mas crescente penetração de PMUs nos sistemas elétricos de potência têm disponibilizado medidas fasoriais para instrumentalizar a operação de redes elétricas, o que abre novas perspectivas também para a monitoração e análise da segurança do sistema. A incorporação de medidas fasoriais à Estimação de Estados, a principal ferramenta da modelagem em tempo real de sistemas de potência é, portanto, um tópico que tem despertado bastante interesse na literatura. Entretanto, bem menos atenção tem sido dedicada ao tratamento de erros grosseiros em estimadores híbridos, que combinam medidas fasoriais sincronizadas e dados oriundos de sistemas SCADA. Esta constatação serve de motivação para este trabalho, que busca explorar a independência estatística das duas classes de medidas com o objetivo de propor métodos eficientes de identificação e eliminação de medidas.

As principais propriedades dos sistemas de medição fasorial são expostas no Capítulo 2 juntamente com as características do tradicional sistema SCADA. Ambos são fontes de dados para a EESP, sendo os responsáveis por adquirir as telemedidas e enviá-las para que os estimadores processem essas quantidades.

A alta taxa de amostragem e o elevado nível de exatidão inerentes aos sincrofasores, indicam que a utilização dessa nova classe de medida na EESP deve proporcionar melhorias significativas nos processos de monitoração e análise de segurança do sistema.

No Capítulo 3 as diversas etapas do processo de estimação de estados são descritas em detalhes. Nele são introduzidos os conceitos fundamentais relacionados à formulação e solução do problema, inclusive a maneira pela qual são incluídas informações *a priori* em um problema de estimação de estados a ser resolvido através do método da equação normal. Este é um recurso de extrema relevância para contornar os problemas da falta de observabilidade do sistema com respeito apenas às medidas fasoriais sincronizadas.

Nos últimos anos, esforços têm sido realizados para encontrar maneiras de incorporar as medidas fasoriais na estimação de estados. A revisão da literatura técnica mostra que diversas estratégias têm sido apresentadas. Dentre essas técnicas propostas, o método de fusão de estimativas proposto em [13] foi o adotado para a realização deste trabalho. A fusão de estimativas é vista como um método adequado

para combinar as informações SCADA e fasoriais, pois além de fornecer excelentes resultados relatados em trabalhos anteriores, não requer que o sistema seja observável com respeito às medidas fasoriais, e ainda utiliza um módulo de estimação para cada classe de medida processada pelo método. Este fato torna possível o aproveitamento de estimadores convencionais já existentes nos centros de operação.

O Capítulo 4 é o responsável por apresentar os conceitos da teoria da fusão de dados com múltiplos sensores, sua aplicação para sistemas de potência, e a grande vantagem em utilizá-la na integração das duas classes de medidas. Além da já mencionada vantagem de manter os estimadores convencionais não lineares existentes, possibilita a utilização de um estimador linear para medidas fasoriais.

Ainda que apresentem alto nível de exatidão, telemedidas oriundas de PMUs, assim como as medidas convencionais, também são susceptíveis a erros de medição. O processamento de erros grosseiros associados às duas classes de medidas ainda se constitui em um desafio. Uma contribuição recente nesse sentido é apresentada em [18], onde a hipótese de independência estatística das duas classes de medidas possibilita a identificação de medidas espúrias a partir do cruzamento de informações entre os módulos de estimação.

O Capítulo 5 apresenta as técnicas de identificação de EGs avaliadas neste trabalho. A exploração destes métodos torna possível apontar a combinação de métodos mais efetiva para o tratamento de medidas espúrias. Esta dissertação aprofunda a metodologia de [13] e apresenta uma abordagem que possibilita o processamento de erros grosseiros em distintas situações dos sistemas de potência monitorados por medidas convencionais e fasoriais sincronizadas.

O desempenho na detecção/identificação de medidas espúrias e o impacto resultante na estimativa final (obtida pós fusão de estimativas) são avaliados a partir da comparação dos resultados de diversos testes para distintos métodos de processamento de erros grosseiros. Esta análise é realizada com base nas simulações apresentadas no Capítulo 6.

Os resultados dos estudos de caso apresentados permitem concluir que, mesmo considerando-se que a inclusão de PMUs no sistema de potência tende a ser gradual, os benefícios das medidas fasoriais podem ser vantajosamente estendidos à estimação de estados. Assim, ainda que o sistema de potência não seja observável por medidas fasoriais, as técnicas apresentadas nesta dissertação demonstram a possibilidade de depurar as estimativas finais dos estados do sistema mediante um processamento mais eficaz de erros grosseiros em medidas. Fatores tais como: inclusão de informações *a priori* para contornar o problema de

observabilidade; utilização do cruzamento de informações para melhorar a precisão e agilidade da identificação de EG, e combinação destes métodos com os convencionais, possibilitam o processamento de erros grosseiros para diferentes casos, incluindo aqueles em que se verifica a presença de EG nas duas classes de medidas. Os resultados apontam que, para um melhor desempenho, devem ser combinados o cruzamento de informações com o método HTI. Após essa etapa, a metodologia proposta é concluída mediante o estágio final de fusão de estimativas.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A metodologia proposta nesta dissertação é viável e eficiente para o processamento de erros grosseiros na estimação de estados em sistemas monitorados por medidas convencionais e fasoriais. Ainda que essa metodologia possibilite a inclusão das medidas fasoriais de maneira vantajosa para a estimação de estados, certamente existem alguns pontos que ainda devem ser investigados em pesquisas futuras.

Alguns tópicos correlacionados com o tema deste trabalho são descritos na sequência:

- Investigar a aplicação de estimadores baseados em critérios não-quadráticos associados ao conceito de janelas de Parzen [44, 45, 77, 78] aplicado aos módulos de estimação individuais. Estes estimadores gozam de propriedades de resiliência face à presença de erros grosseiros, ou seja, podem potencialmente rejeitar os erros grosseiros durante a execução do próprio processo de estimação, sem a necessidade de pós-processamento para identificar e eliminar medidas errôneas;
- Estender o conceito de fusão de estimativas de modo a substituir o critério usual de mínima variância por critérios baseados na maximização da correntropia [44, 45, 77, 78]. Esta nova abordagem da fusão de estimativas seria mais consistente com os estimadores resilientes mencionados no item anterior;
- Outro fator importante que pode afetar a estimação de estados, além de medidas contaminadas por erros grosseiros, é a presença de erros de topologia. Tais erros são causados por informações digitais incorretas sobre os *status* de chaves seccionadoras e disjuntores. Na presença de erros de topologia, o configurador de redes irá modelar o sistema de uma forma que não condiz com a

realidade. Os conceitos abordados nos dois itens anteriores também podem ser explorados para identificar e eliminar erros de topologia associado à estimadores de classes de medidas distintas;

- Aprofundar investigações sobre métodos para compatibilizar o grande volume de dados fornecidos pelas PMUs, gerados com taxas de amostragem muito superiores à das medidas convencionais, com as medidas assíncronas oriundas do sistema SCADA [12, 14].

ANEXO A – Notação Utilizada para Medições nos Ramos do Sistema

Os Anexos B e C a seguir detalham os planos de medição, de medidas SCADA e fasoriais, utilizado nos sistemas-teste IEEE 118 e 300 barras. As tabelas referentes às medidas de fluxo de potência (ativo/reactivo) e também medidas de módulo e fase das correntes dos ramos do sistema indicam o circuito na qual está localizado o medidor, bem como a extremidade onde a medida é adquirida. O exemplo a seguir apresenta a notação utilizada para detalhar o plano de medição:

Considere uma linha de transmissão (#1) que conecta as barras 1 e 5 de um sistema:

Tabela A.1 – Exemplo

Número do Circuito (#)	Barra	
	De	Para
1	1	5

Para identificar a localização do(s) medidor(es) neste Ramo 1, é utilizada a notação descrita a seguir:

- 1(1): Esta situação indica que o medidor está situado na extremidade mais próxima à Barra 1 do sistema.
- 1(2): Já o número 2 aponta que a medição é realizada na extremidade referente a Barra “para”, ou Barra 5 neste exemplo.
- 1(3): Por fim, (3) ilustra a presença de medidores nos dois extremos da linha de transmissão.

ANEXO B – Planos de Medição SCADA e Fasorial
Sistema-teste IEEE 118-barras

B.0.1 Medidas Convencionais

Tabela B.1 – Medidas de Módulo de Tensão

Barras Monitoradas por Medidas de Módulo de Tensão
2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 19, 21, 22, 25, 26, 27, 30, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 44, 45, 48, 49, 50, 53, 56, 57, 58, 63, 64, 65, 68, 69, 71, 72, 73, 75, 78, 79, 83, 84, 85, 87, 89, 90, 92, 93, 94, 96, 99, 103, 104, 105, 108, 109, 111, 112, 113, 116, 118

Tabela B.2 – Medidas de Injeção de Potência

Barras Monitoradas por Injeção de Potência Ativa e Reativa
1, 4, 5, 8, 9, 10, 13, 16, 17, 18, 20, 23, 24, 25, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 56, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 69, 71, 73, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 91, 92, 93, 95, 98, 99, 101, 102, 105, 106, 107, 110, 112, 113, 114, 116, 117

Tabela B.3 – Medidas de Fluxo de Potência

Ramos Monitorados por Fluxo de Potência Ativa e Reativa
2(1), 3(1), 5(1), 6(1), 7(1), 9(1), 10(1), 11(2), 12(1), 13(2), 14(2), 17(1), 18(1), 20(2), 22(1), 23(1), 25(1), 26(2), 28(2), 30(1), 31(1), 33(2), 35(1), 36(2), 37(2), 38(1), 39(1), 42(2), 43(2), 44(2), 46(1), 47(1), 48(2), 50(2), 52(2), 53(1), 54(2), 56(2), 58(1), 59(2), 62(2), 64(1), 65(2), 67(2), 68(2), 69(2), 70(2), 73(2), 75(1), 77(2), 78(2), 79(2), 80(1), 82(2), 85(2), 87(1), 88(1), 89(2), 91(2), 92(2), 93(1), 95(1), 97(1), 98(1), 102(1), 103(1), 104(1), 106(1), 108(1), 109(2), 111(1), 112(1), 114(1), 117(1), 119(1), 120(1), 121(2), 122(2), 124(2), 126(1), 127(2), 128(2), 129(1), 130(2), 132(2), 133(2), 134(2), 135(2), 136(2), 139(2), 142(2), 143(2), 144(2), 146(1), 147(1), 148(2), 150(2), 151(2), 152(1), 154(1), 155(1), 157(2), 159(1), 160(2), 161(2), 162(2), 164(2), 165(1), 167(2), 169(1), 170(2), 171(1), 173(2), 175(2), 176(2), 179(2)

B.0.2 Medidas Fasoriais

Tabela B.4 – Medidas de Tensão Complexa

Barras Monitoradas por Medidas de Módulo e Ângulo de Tensão
2, 4, 6, 8, 10, 15, 16, 20, 23, 25, 27, 31, 33, 35, 38, 40, 42, 45, 48, 51, 54, 59, 68, 74, 77, 80, 85, 86, 91, 99, 105, 106, 111, 113, 118

Tabela B.5 – Medidas de Corrente Complexa

Ramos Monitorados por Medidas Fasoriais de Corrente
7(1), 12(1), 17(1), 19(1), 29(1), 32(1), 40(1), 43(1), 48(1), 51(1), 57(1), 60(1), 64(1), 69(1), 71(1), 74(1), 77(1), 82(1), 88(1), 92(1), 100(1), 114(1), 121(1), 126(1), 131(1), 141(1), 144(1), 149(1), 161(1), 171(1), 174(1)

ANEXO C – Planos de Medição SCADA e Fasorial
Sistema-teste IEEE 300-barras

C.0.3 Medidas Convencionais

Tabela C.1 – Medidas de Módulo de Tensão

Barras Monitoradas por Medidas de Módulo de Tensão
2, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 33, 34, 36, 38, 40, 41, 44, 45, 48, 49, 53, 54, 57, 59, 60, 61, 63, 69, 71, 74, 76, 79, 81, 84, 85, 88, 89, 91, 94, 97, 99, 100, 102, 105, 107, 112, 114, 116, 117, 118, 120, 122, 124, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 135, 138, 139, 140, 145, 147, 149, 150, 152, 154, 155, 157, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 173, 174, 175, 176, 178, 180, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 247, 248, 249, 250, 281, 319, 320, 322, 323, 324, 526, 531, 552, 562, 609, 664, 1190, 1200, 2040, 7001, 7003, 7011, 7012, 7017, 7023, 7024, 7039, 7049, 7055, 7057, 7061, 7062, 7071, 7130, 7139, 9001, 9003, 9005, 9006, 9007, 9012, 9021, 9022, 9023, 9024, 9025, 9026, 9031, 9032, 9033, 9034, 9036, 9037, 9038, 9041, 9042, 9044, 9052, 9053, 9054, 9055, 9071, 9072, 9533

Tabela C.2 – Medidas de Injeção de Potência

Barras Monitoradas por Injeção de Potência Ativa e Reativa
2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 33, 34, 36, 38, 40, 41, 44, 45, 47, 49, 51, 53, 54, 57, 59, 60, 61, 63, 69, 71, 74, 76, 77, 79, 81, 84, 86, 88, 89, 91, 94, 97, 99, 100, 102, 104, 105, 107, 109, 112, 114, 116, 118, 120, 121, 123, 124, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 135, 137, 138, 139, 140, 145, 147, 148, 149, 150, 152, 154, 155, 157, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 244, 245, 247, 248, 249, 250, 281, 319, 320, 322, 323, 324, 526, 531, 552, 562, 609, 664, 1190, 1200, 2040, 7001, 7003, 7011, 7012, 7017, 7024, 7039, 7049, 7055, 7057, 7061, 7062, 7071, 7130, 7166, 9001, 9003, 9005, 9006, 9007, 9012, 9022, 9023, 9024, 9025, 9026, 9031, 9032, 9033, 9034, 9036, 9037, 9038, 9041, 9042, 9044, 9052, 9053, 9054, 9055, 9071, 9072, 9121, 9533

Tabela C.3 – Medidas de Fluxo de Potência

Ramos Monitorados por Fluxo de Potência Ativa e Reativa	
1(1), 2(2), 3(1), 4(2), 5(1), 6(2), 7(1), 8(2), 9(1), 10(2), 11(1), 12(2), 13(1), 14(2), 15(1), 16(1), 18(2), 19(1), 20(1), 21(1), 22(2), 24(1), 25(2), 26(2), 27(1), 28(1), 29(2), 30(2), 31(2), 32(1), 33(1), 35(2), 36(1), 37(2), 38(1), 40(2), 41(2), 42(2), 43(2), 45(2), 46(1), 47(1), 48(2), 49(1), 50(2), 51(1), 52(1), 53(1), 55(2), 57(1), 58(1), 59(1), 61(2), 62(1), 65(2), 66(1), 67(1), 69(1), 71(2), 72(1), 73(2), 74(1), 75(1), 76(1), 77(1), 79(2), 80(1), 81(1), 84(2), 86(1), 87(1), 88(1), 90(1), 91(1), 92(1), 93(1), 94(2), 95(2), 97(2), 99(2), 102(2), 104(1), 105(2), 106(2), 107(1), 108(2), 109(1), 110(1), 112(1), 113(1), 114(1), 115(1), 116(1), 117(2), 118(1), 119(2), 120(1), 121(2), 123(2), 124(2), 126(2), 128(1), 129(1), 130(2), 132(2), 135(2), 136(2), 137(1), 138(1), 139(1), 141(1), 143(1), 145(2), 147(2), 150(3), 152(2), 153(2), 154(1), 156(1), 157(2), 161(1), 164(1), 167(1), 171(1), 172(1), 174(2), 175(1), 178(1), 180(2), 181(1), 182(1), 183(2), 184(1), 185(2), 186(2), 187(2), 189(2), 192(1), 193(2), 194(2), 195(2), 196(2), 198(2), 200(3), 201(2), 202(2), 203(2), 204(2), 205(1), 206(1), 208(1), 209(1), 210(1), 211(1), 212(1), 214(1), 216(1), 217(1), 218(1), 219(2), 221(2), 224(2), 226(1), 227(1), 228(2), 230(2), 231(2), 234(2), 235(1), 236(1), 237(2), 238(1), 239(1), 241(2), 243(1), 245(1), 248(2), 251(1), 252(1), 254(2), 255(1), 257(2), 261(2), 264(2), 266(1), 268(1), 269(2), 271(1), 273(1), 276(1), 277(2), 278(1), 279(2), 281(3), 285(2), 286(2), 289(2), 291(2), 292(2), 294(1), 296(1), 298(1), 300(1), 301(1), 302(1), 304(1), 306(1), 307(1), 309(1), 310(1), 311(1), 312(2), 313(2), 314(2), 316(1), 317(2), 320(2), 321(1), 322(1), 323(2), 325(1), 326(2), 327(1), 329(2), 330(2), 331(2), 333(2), 336(2), 338(1), 342(2), 343(2), 345(2), 347(2), 348(2), 349(1), 351(1), 352(1), 353(1), 355(1), 359(1), 361(1), 363(1), 364(1), 365(1), 368(1), 369(3), 372(2), 373(2), 376(2), 377(1), 378(1), 379(1), 380(1), 381(2), 382(1), 383(1), 384(2), 385(2), 386(1), 387(1), 388(1), 390(1), 391(2), 392(1), 393(2), 394(1), 395(1), 397(2), 398(1), 399(1), 400(1), 401(2), 402(2), 404(1), 405(2), 406(2), 407(2), 409(3), 410(2), 411(2)	

C.0.4 Medidas Fasoriais

Tabela C.4 – Medidas de Tensão Complexa

Barras Monitoradas por Medidas de Módulo e Ângulo de Tensão
1, 3, 5, 7, 10, 12, 16, 20, 33, 37, 40, 41, 64, 69, 77, 78, 79, 87, 97, 98, 100, 102, 123, 125, 126, 127, 129, 130, 133, 160, 172, 173, 174, 176, 201, 220, 222, 239, 242, 243, 245, 246, 247, 250, 319, 324, 526, 609, 664, 1190, 1200, 2040, 7011, 7012, 7017, 7055, 7061 7071, 7130, 7166, 9001, 9002, 9003, 9005, 9006, 9007, 9012, 9055, 9121, 9533

Tabela C.5 – Medidas de Corrente Complexa

Ramos Monitorados por Medidas Fasoriais de Corrente
1(3), 2(3), 3(3), 4(3), 5(1), 6(1), 7(1), 8(1), 9(3), 10(3), 11(3), 12(3), 13(3), 14(3), 15(1), 18(1), 21(1), 22(1), 23(3), 24(1), 25(1), 26(1), 32(1), 33(1), 34(1), 35(1), 36(1), 37(1), 71(1), 72(1), 73(3), 74(3), 80(1), 81(3), 82(3), 83(1), 84(1), 85(1), 89(1), 90(1), 91(1), 92(1), 132(3), 133(1), 134(1), 135(1), 136(3), 137(1), 138(1), 152(3), 153(3), 154(1), 155(3), 156(3), 161(3), 162(1), 183(2), 184(2), 185(1), 186(3), 187(3), 188(3), 189(3), 190(1), 191(1), 192(1), 193(1), 194(1), 195(1), 196(1), 197(2), 198(2), 199(3), 200(3), 201(1), 202(1), 203(1), 204(1), 205(1), 206(1), 207(1), 208(1), 247(3), 248(3), 249(3), 250(1), 251(3), 252(2), 254(1), 324(3), 325(1), 326(1), 327(3), 329(3), 330(3), 331(3), 334(2), 335(3), 336(1), 337(1), 338(3), 339(1), 340(1), 341(3), 343(1), 344(2), 355(1), 372(1), 380(1), 389(2), 390(2), 392(2), 395(1), 397(1), 411(1)

REFERÊNCIAS

- [1] MONTICELLI, A. *Power system state estimation: a generalized approach*. Norwell, MA, USA: Kluwer, 1999.
- [2] ABUR, A.; GÓMEZ-EXPÓSITO, A. *Power system state estimation: theory and implementation*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2004.
- [3] SIMÕES COSTA, A. J. A. *Power system state estimation: orthogonal methods for estimation and bad data processing, and techniques for topological observability*. Tese (Doutorado) — University of Waterloo - Canada, 1981.
- [4] PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Synchronized phasor measurements and their applications*. New York, NY, USA: Springer Science & Business Media, 2008.
- [5] ALBUQUERQUE, A. N. C. de. *Estratégias em dois estágios para incorporar medidas fasoriais sincronizadas na estimação de estados em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- [6] BEZ, D. M. *Estratégia em dois estágios utilizando rotações de Givens em blocos para a inclusão de medidas fasoriais na estimação de estados em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- [7] EDER, C. J. F. *Métodos de fusão de estimativas para agregação de múltiplas fontes de informação à estimação de estados em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- [8] ZHOU, M. et al. An alternative for including phasor measurements in state estimators. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1930–1936, 2006.
- [9] NUQUI, R. F.; PHADKE, A. G. Hybrid linear state estimation utilizing synchronized phasor measurements. In: *IEEE Power Tech*. Lausanne, Switzerland: IEEE, Jul. 2007.
- [10] SIMÕES COSTA, A.; ALBUQUERQUE, A. A two-stage orthogonal estimator to incorporate phasor measurements into power

- system real-time modeling. In: *17th Power Systems Computation Conference (PSCC)*. Stockholm, Sweden: PSCC, Aug. 2011.
- [11] SIMÕES COSTA, A.; ALBUQUERQUE, A. Inclusão de medições fasoriais na estimação de estados com preservação da estrutura dos estimadores convencionais. In: *XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*. Florianópolis, Brasil: SNPTEE, Out. 2011.
- [12] ZHANG, Q. et al. Impact of pmu measurement buffer length on state estimation and its optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 2, p. 1657–1665, May 2013.
- [13] SIMÕES COSTA, A.; ALBUQUERQUE, A.; BEZ, D. An estimation fusion method for including phasor measurements into power system real-time modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 28, n. 2, p. 1910–1920, 2013.
- [14] GLAVIC, M.; VAN CUTSEM, T. Tracking network state from combined scada and synchronized phasor measurements. In: IEEE. *IREP Symposium, Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid*. Rethymnon, Greece, Aug. 2013. p. 1–10.
- [15] EDER, C. J. F.; SIMÕES COSTA, A. J. A. Métodos de fusão para agregar múltiplas classes de dados à estimação de estados de redes elétricas. In: *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*. Belo Horizonte, MG, Brasil: SBA, Set. 2014. p. 3214–3221.
- [16] GUIMARAENS, M. A. R.; COUTTO FILHO, M. B. d.; SOUZA, J. C. S. de. Aperfeiçoamento de estimadores de estado através de medidas de sincrofasores. In: *XIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Espansion Planning (SEPOPE)*. Foz do Iguassu, PR, Brazil: [s.n.], May 2014.
- [17] PHADKE, A. et al. Recent developments in state estimation with phasor measurements. In: *Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*. Seattle, WA, USA: IEEE/PES, Mar. 2009. p. 1–7.
- [18] COUTTO FILHO, M. B. d.; STACCHINI DE, S. J. C.; RIBEIRO GUIMARAENS, M. A. Enhanced bad data processing by phasor-aided state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, IEEE, v. 29, n. 5, p. 2200–2209, 2014.

- [19] GUIMARAENS, M. A. R.; COUTTO FILHO, M. B. d.; SOUZA, J. C. S. de. Bad data suppression through the cooperation between independent state estimators. In: IEEE. *19th Power Systems Computation Conference (PSCC)*. Genoa, Italy, Jun. 2016. p. 1–7.
- [20] SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power system static-state estimation, part i: exact model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS)*, IEEE, n. 1, p. 120–125, 1970.
- [21] SCHWEPPE, F. C.; ROM, D. B. Power system static-state estimation, part ii: approximate model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS)*, IEEE, n. 1, p. 125–130, 1970.
- [22] SCHWEPPE, F. C. Power system static-state estimation, part iii: implementation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS)*, IEEE, n. 1, p. 130–135, 1970.
- [23] MILI, L.; VAN CUTSEM, T.; RIBBENS-PAVELL, M. Hypothesis testing identification: a new method for bad data analysis in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS)*, IEEE, v. 103, n. 11, p. 3239–3252, 1984.
- [24] MILI, L.; VAN CUTSEM, T.; RIBBENS-PAVELLA, M. Bad data identification methods in power system state estimation—a comparative study. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS)*, v. 104, n. 11, 1985.
- [25] CONSTAIN, N. B. P. *Integração de sistemas SCADA com a implementação de controle supervisão em CLP para sistemas de manufatura*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- [26] KRUTZ, R. *Securing SCADA systems*. [S.l.]: Wiley, 2005.
- [27] (SEL), E. de Engenharia da *Schweitzer Engineering Laboratories*. Exemplos de automação em sistemas de supervisão e controle de subestações e redes de distribuição. *O Setor Elétrico*, v. 56, p. 54–60, Setembro de 2010.
- [28] ANDREOLI, E. *Coestimação de estados e topologia em sistemas de potência representados por modelo não-linear*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

- [29] FREITAS, V. S. de. *Processamento do status de dispositivos chaveáveis como informação a priori na estimação integrada de estados e topologia em sistemas elétricos de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- [30] SILVA, N. S. da. *Estimação de estados hierárquica considerando a coestimação de estados e topologia no nível de subestação*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- [31] PHADKE, A. Synchronized phasor measurements - a historical overview. In: *Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. Asia Pacific: IEEE/PES, Oct. 2002. v. 1, p. 476–479.
- [32] EHRENSPERGER, J. G. *Sistemas de medição fasorial sincronizada: análise do estado da arte e aplicações no monitoramento de sistemas de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [33] CENTENO, V.; HU, Y.; ARAÚJO, C. *Projeto do SMF do ONS - Especificação das Unidades de Medição Fasorial (PMU)*. [S.l.]: KEMA, Nov. 2006.
- [34] DECKER, I. C. et al. Performance of a synchronized phasor measurements system in the brazilian power system. In: *IEEE. Power Engineering Society General Meeting*. Montreal, Québec, Canada, Jun. 2006. p. 8–pp.
- [35] CIPRIANI, E.; SIMÕES COSTA, A. J. A. Análise de observabilidade e criticidade de medidas na estimação de estados em sistemas de potência considerando medições fasoriais sincronizadas. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*. Bonito, MS, Brasil: SBA, Set. 2010. p. 3436–3443.
- [36] PHADKE, A. G. et al. Synchronized sampling and phasor measurements for relaying and control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 442–452, 1994.
- [37] IEEE-SA. *C37.118.1-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*.
- [38] IEEE-SA. *C37.118.1a-2014 - IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems – Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements*.

- [39] IEEE-SA. *C37.118.2-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems*.
- [40] PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements in power systems. *IEEE Computer Applications in Power*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 10–15, Apr. 1993.
- [41] ZIMMER, V. et al. Aplicação de dados de medição fasorial sincronizada na análise do desempenho da interligação ac-ro/sin. In: *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. Goiânia, GO, Brasil: SBA, Mai. 2012.
- [42] DOS SANTOS, H. C. T. Estrutura e função dos centros de controle do ons. In: *AbineeTEC*. São Paulo, SP, Brasil: AbineeTEC, Abr. 2007. Disponível em: <<http://www.tec.abinee.org.br/2007/arquivos/sl503.pdf>>.
- [43] PIRES, R. C. *Estimadores definidos com critérios estatístico-numéricos aplicados à estimação robusta de estados em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- [44] MIRANDA, V.; SANTOS, A.; PEREIRA, J. State estimation based on correntropy: a proof of concept. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, n. 4, p. 1888–1889, 2009.
- [45] WU, W.-c. et al. Robust state estimation method based on maximum exponential square. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 5, n. 11, p. 1165–1172, 2011.
- [46] VICENTIM, C. A. *Análise estática de microrredes: modelagem de sistemas armazenadores de energia e monitoração em tempo real via estimação de estados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- [47] GARCIA, A.; MONTICELLI, A.; ABREU, P. Fast decoupled state estimation and bad data processing. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 5, p. 1645–1652, 1979.
- [48] GJELSVIK, A.; AAM, S.; HOLTEN, L. Hachtel's augmented matrix method-a rapid method improving numerical stability in power system static state estimation. *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 11, p. 2987–2993, 1985.

- [49] SIMÕES COSTA, A.; QUINTANA, V. H. An orthogonal row processing algorithm for power system sequential state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 8, p. 3791–3800, 1981.
- [50] QUINTANA, V. H.; SIMÕES COSTA, A.; MIER, M. Bad data detection and identification techniques using estimation orthogonal methods. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 9, p. 3356–3364, 1982.
- [51] MONTICELLI, A.; MURARI, C.; WU, F. F. A hybrid state estimator: Solving normal equations by orthogonal transformations. *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 12, p. 3460–3468, 1985.
- [52] QUINTANA, V. H.; SIMÕES COSTA, A. J. A.; MANDEL, A. Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS)*, IEEE, v. 101, n. 3, p. 454–462, 1982.
- [53] CIPRIANI, E. *Análise de observabilidade e criticidade de medidas na estimação de estados em sistemas de potência considerando medições fasoriais sincronizadas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [54] HANDSCHIN, E. et al. Bad data analysis for power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 94, n. 2, p. 329–337, 1975.
- [55] MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Reliable bad data processing for real-time state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 5, p. 1126–1139, 1983.
- [56] SIMÕES COSTA, A.; SALGADO, R. Bad data recovery for orthogonal row processing state estimators. In: *Proc. of the CIGRE-IFAC Symp. on Control Appl. for Power System Security*. Florence, Italy: [s.n.], 1983. p. 101–01.
- [57] LIU, J.; GEORGE, A. *Computer solution of large sparse positive definite system*. [S.l.]: Prentice Hall, 1981.
- [58] GOLUB, G. H.; LOAN, C. F. V. *Matrix computations*. Baltimore, Md, USA: Jhons Hopkins University Press, 2013.

- [59] LOURENÇO, E. M. et al. A topology error identification method directly based on collinearity tests. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1920–1929, 2006.
- [60] LIGGINS, M.; HALL, D.; LLINAS, J. *Handbook of multisensor data fusion: theory and practice*. [S.l.]: CRC, 2008.
- [61] MITCHELL, H. *Multi-sensor data fusion: an introduction*. [S.l.]: Springer, 2007.
- [62] ANTONY, R. T. *Principles of data fusion automation*. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 1995.
- [63] LORA, F. A. S.; HEMERLY, E. M.; LAGES, W. F. Estimacão em tempo real de posição e orientação de robôs móveis utilizando sensores com diferentes taxas de amostragem. In: SBA. *Anais do 3o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. Vitória, ES, Brasil, 1997.
- [64] LUO, R. C.; YIH, C.-C.; SU, K. L. Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions. *IEEE Sensors journal*, IEEE, v. 2, n. 2, p. 107–119, 2002.
- [65] HALL, D.; MCMULLEN, S. *Mathematical techniques in multi-sensor data fusion*. [S.l.]: Artech House Publishers, 2004.
- [66] NANDAKUMAR, K. *Integration of multiple cues in biometric systems*. Dissertação (Mestrado) — Michigan State University, 2005.
- [67] HALL, D. L.; LLINAS, J. An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 85, n. 1, p. 6–23, Jan. 1997.
- [68] LI, X. R.; ZHANG, K. Optimal linear estimation fusion? part iv: Optimality and efficiency of distributed fusion. In: *Proc. 2001 International Conf. on Information Fusion*. [S.l.: s.n.], 2001.
- [69] LI, X. et al. Optimal linear estimation fusion i. unified fusion rules. *IEEE Transaction on Information Theory*, IEEE, v. 49, n. 9, p. 2192–2208, 2003.
- [70] ZHU, Y.; LI, X. Best linear unbiased estimation fusion. *Proceedings of the International Conference on Information Fusion*, Seattle, USA, p. 1054–1061, Jul. 1999.

- [71] ZHU, Y.; LI, X. The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 22, n. 6, p. 803–805, Nov. 1986.
- [72] HIGHAM, N. J. *Accuracy and stability of numerical algorithms*. Philadelphia, PA, USA: Siam, 2002.
- [73] LEITES, A. R. da C. *Processamento de medidas fasoriais de tensão e corrente na estimação de estados em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [74] CLEMENTS, K.; KRUMPHOLZ, G.; DAVIS, P. Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 4, p. 1779–1787, 1981.
- [75] KEMA. *Metrics for determining the impact of phasor measurements on power system state estimation*. [S.l.]: Eastern Interconnection Phasor Project, 2006.
- [76] Acessos em: 06/04/2015, 22/02/2016, 02/03/2016. Disponível em: <<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>>.
- [77] PARZEN, E. On estimation of a probability density function and mode. *The annals of mathematical statistics*, JSTOR, v. 33, n. 3, p. 1065–1076, 1962.
- [78] OPARA, J. *Information theoretic state estimation in power systems*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.